

일광광산의 절리분포 특성과 광산배수 산성도의 관계

최재영¹ · 엄정기^{2*} · 권현호³ · 심연식³

¹한국과학기술원, ²부경대학교 에너지자원공학과, ³한국광해관리공단

Relationship between fracture distribution and the acidity of mine drainage at the Il-Gwang Mine

Jaeyoung Choi¹, Jeong-Gi Um^{2*}, Hyun-Ho Kwon³, and Yon-Sik Shim³

¹Korea Institute of Science and Technology-Gangneung

²Dept. of Energy Resources Engineering, Pukyong National University,

³Mine Reclamation Corp.

이 연구는 부산광역시 기장군 일광면 일대의 일광광산 주변에 위치한 절리압반에 대하여 체계론적 해석기법을 적용하여 삼차원 절리연결구조를 구현하고 절리의 기하학적 특성에 따른 광산배수 산성도의 특성을 고찰하였다. 절리 분포특성을 규명하기 위하여 산성광산배수 발생 가능지역을 중심으로 지표 선형조사선 과 시추공영상촬영에 의한 절리조사를 실시하였다. 일광광산의 현장실험 압반에 대한 삼차원 절리연결구조 모델이 체계론적으로 구현되었다. 예측된 절리분포의 타당성을 검토한 결과 모사된 삼차원 절리연결구조는 현장압반의 절리 분포특성을 잘 반영하는 것으로 나타났으며 광산배수 유동에 대한 개관적인 개념을 제공할 수 있다. 현장에서 자연수 주입으로 산성배수를 유도하기 위한 주입공 1공 및 관측공 3공이 설치되었다. 총 29일 동안 주입공으로 투입된 자연수를 모니터링한 결과 절리연결구조에 따른 절리의 기하학적 모수와 산성광산배수 발생 간에 상관성이 있는 것으로 해석되었다. 절리주향의 상대빈도가 상대적으로 큰 방향으로의 관측공에서 높은 값의 pH를, 그리고 낮은 값의 SO_4^{2-} 농도가 측정되었다. 전반적인 추세는 절리주향의 상대빈도가 증가할수록 pH는 로그함수적인 증가를 보이며 SO_4^{2-} 농도는 로그함수적인 감소를 나타내며 높은 결정계수의 상관성을 갖는다. 절리밀도가 상대적으로 큰 방향으로의 관측공에서 낮은 값의 pH를, 그리고 높은 값의 SO_4^{2-} 농도가 측정되었다. 전반적인 추세는 1-D 절리밀도가 증가할수록 pH는 음지수함수적인 감소를 보이며 SO_4^{2-} 농도는 지수함수적인 증가를 나타낸다.

주요어 : 일광광산, 절리연결구조, 산성광산배수, 현장실험

We established a stochastic 3-D fracture network system for fractured rock masses located in Il-Gwang Mine, Busan, to explore the relationship between the acidity of mine drainage and fracture geometry. A field scanline survey and borehole image processing were performed to estimate the best probability distributions of fracture geometry parameters. The stochastic 3-D fracture network system constructed for the rock masses was validated and deemed to be successful. The 3-D fracture network model was suitable for developing conceptual ideas on fluid flow in fractures at a field experimental site. An injection well and three observation wells were drilled at the field experimental site to monitor the acidity of mine drainage induced by the injection of fresh water. The field experiment, which was run for 29 days, yielded a significant relationship (with a high coefficient of determination) between the fracture geometry parameters and the acidity of mine drainage. The results show that pH increased with increasing relative frequency of fracture strike, and decreased with increasing fracture density. The concentration of SO_4^{2-} decreased with increasing relative frequency of fracture strike, and increased with increasing fracture density.

Key words : Il-Gwang mine, fracture network, acid mine drainage, field experiment

*Corresponding author: jum@pknu.ac.kr

서 언

광산지역 암반에 존재 가능한 황화광물은 열수변질작용으로 직접 침전되거나, 퇴적물의 속성작용 등 다양한 지질작용에 의하여 생성된다. 황화광물 중 가장 대표적인 황철석은 여러 가지 다양한 중금속과 함께 존재하는데, 광산개발 및 토목공사 등으로 인해 대기에 노출되고 물에 접촉된 후 산화반응을 통해 산성배수의 원인이 된다. 산성광산배수(acid mine drainage, AMD)에 다량 함유되어 배출되는 중금속은 지표수, 지하수 및 토양 환경오염의 주요한 요인 중 하나로서 많은 문제를 일으키기도 한다 (Akciil and Koldas, 2006). 산성배수가 발생된 후 이를 처리하기 위해서는 막대한 비용이 소요될 수 있으며 산성광산배수를 사전에 억제하기 위한 노력은 비용적인 측면이나 환경적인 측면에서 매우 중요하다고 볼 수 있다. 국내에서도 이에 대한 심각성을 인식하고 관련 기관 및 연구자들을 중심으로 광산주변에 발생하는 산성광산배수를 사전에 억제하기 위한 기술이 개발되고 있으나 아직 초보단계이고, 국내에 산성광산배수 저감을 위한 기술 및 공정 개발은 지속적인 발전을 요하는 실정이다.

산성광산배수의 사전 억제를 위해서는 암반 내에서 산성광산배수의 발생 및 이동 특성을 파악해야한다. 용해된 중금속의 양, pH와 이온 강도, 광물 표면의 특성, 유기물 그리고 경쟁적 이온의 존재 등 다양한 인자에 의해 형성되는 산성광산배수의 이동성은 주변 지질, 암상, 절리, 수리학적 특성에 의해 결정될 수 있다. 이와 같은 산성광산배수 발생을 사전에 예측하고, 예측된 오염 발생을 억제할 수 있는 가능성은 지질구조와 암반특성을 충분히 이해할 때에 확보될 수 있다. 특히, 광산개발이 종료된 후 채굴공동이나 암반사면에 있어서의 산성광산배수 발생 요인은 주로 대상 암반에 존재하는 절리의 기하학적 특성에 크게 좌우될 수 있다. 따라서 절리암반의 수리학적 특성을 파악하고 광산배수의 예측 및 억제 기술의 적용에 있어서 선행되어야 할 요소는 대상 암반에 분포하는 절리의 기하학적 특성을 정확하게 인지하는 것이다. 일반적으로 절리의 기하학적 특성은 변동성 (variability)과 불확실성(uncertainty)을 수반하므로 대상 암반의 삼차원적 절리연결구조를 파악하기 위해서는 체계론적 해석 기법을 사용하는 것이 보편적이다(허인실 외, 2006).

이 연구는 절리암반의 특성이 고려된 사용자 중심의 인간 친화적 광산배수 예측 및 제어를 위한 기초 핵심요소 연구개발의 일환으로 부산광역시 기장군 일광면 일대의 일광광산 주변에 위치한 절리암반에 대하여 체계론적 해석 기법을 적용하여 삼차원 절리연결구조를 구현하고 절리의

기하학적 특성에 따른 광산배수 산성도의 변화를 고찰하였다. 현장암반에서 자연수 주입으로 산성배수를 유도하기 위한 주입공 및 관측공 설치를 위하여 지표 노두에 대한 선형조사선(scanline) 조사를 바탕으로 절리분포 특성이 파악되었다. 이를 바탕으로 현장에 주입공 1공과 관측공 3공이 시공되었으며, 이들 시추공에서 시추공영상촬영을 수행하여 절리자료가 취득되었다. 현장에 분포하는 절리에 대한 선형조사선 자료와 시추공 자료를 통합하여 절리의 기하학적 요소에 대한 확률분포를 기초로 몬테카를로 모사 기법(허인실 외, 2006)을 적용하여 연구지역에 대한 삼차원 절리연결구조를 구현하였으며 타당성을 검토하여 현장암반의 절리연결구조를 대표할 수 있는 삼차원 절리연결구조 모델이 제시되었다. 본 연구는 이와 같은 삼차원 절리연결구조 모델에 기반을 둔 절리의 방향성, 밀도 등의 기하학적 특성치의 변화가 광산배수 산성도에 미치는 영향에 대하여 규명하고자 한다.

현장조사 및 현장실험

일광광산은 부산광역시 기장군 일광면 원리 일대(14 국도변)에 위치하는 등록번호 제8152호 광산으로 금, 은, 동, 연, 중석이 주광종이다. 이 광산은 1938-1945년 사이에 우리나라 최고의 동광 생산실적을 기록하기도 하였으나, 이 후 소규모의 채광이 이루어지다 현재 폐광된 상태이다. 광상을 구성하는 광물은 황동광, 섬아연광, 황철광, 유비철광, 자류철광, 방연광, 회중석, 철망간중석 등 다양하다.

절리조사를 위하여 광산배수 발생 가능성이 높다고 판단된 일광광산의 갱구부 및 인근에서 총 3개소(IC1, IC3, IC5)의 선형조사선 조사가 실시되었다(Fig. 1). 선형조사선

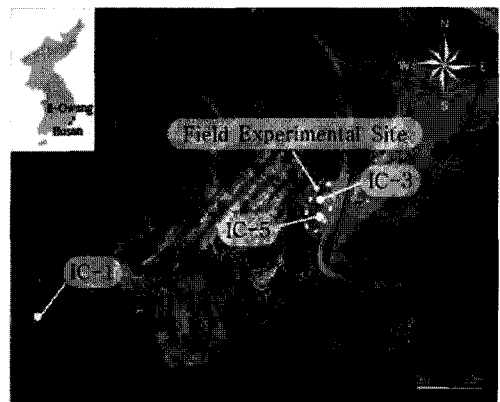


Fig. 1. Location of fracture surveys at the Il-Gwang Mine, Busan (modified from the Daum Map; <http://local.daum.net/>).

조사시 줄자를 사용하여 1-D 축선을 지표 노두에 설치하고 조사선과 교차하는 절리의 방향성, 간격, 연장성, 간극 및 충전물 등이 측정·기록되었다. 연구지역 암반의 절리면 거칠기(JRC) 및 절리면 압축강도(JCS) 등의 역학적 특성도 파악되었는데, 프로파일계이지와 슈미트해머를 사용하여 3개소에 분포하는 노두를 대상으로 절리면 거칠기와 슈미트 반발지수를 측정하여 이들 지반정수에 대한 확률분포가 추정되었다. JCS는 슈미트해머 타격시험 결과로 추정할 수 있다. 또한, 현장의 노두와 시추 코어등에 대하여 암질지수(RQD), 풍화상태, JCS, JRC, 분리면의 간격 및 연장성, 충전물 특성, 지하수의 유입정도 등을 고려하여 RMR (Bieniawski, 1979)에 의한 암반분류가 수행되었다. 이와 같은 현장조사 결과가 Table 1과 2에 수록되어 있다.

일광광산의 지표 노두에서 선형조사선에 의한 방향자료로부터 클러스터링 알고리즘(Shanley and Mahtab, 1976; Mhatab and Yegulalp, 1984; 허인실 외 2006)을 사용하여 구분된 절리군은 N-S 방향과 NE-SW 방향으로 주방향성을 형성하며 NEE-SWW 방향으로 부방향성을 갖는다. 절리간격은 대체로 조밀한 편이다. 절리의 연장성은 N-E 방향으로 최대 2m이상의 긴 연장성을 갖기도 하지만 다른 절리군 방향으로는 대체로 1m 이내의 소규모로 발달한다. 절리면에 대한 슈미트해머 반발지수로 추정된 JCS는 일축압축시험이나 점하중시험에 비해 신뢰성은 낮지만 시험법이 비교적 간단하고 절리면에 바로 적용하여 JCS 추정이 가능한 장점이 있다. Table 2에 수록된 결과에서

절리면 압축강도는 0.2이상의 높은 P값을 갖으며 정규분포가 매우 적합함을 알 수 있다. 평균 JCS는 116MPa로 추정되었으며 이는 현장의 암반이 풍화의 영향을 적게 받은 비교적 신선한 암반임을 지시한다. 연구지역에서 RQD는 평균 41로 비교적 낮게 산출되었다. 암반 분류를 위한 종합적인 RMR은 67점으로 평가되어 암반등급 II-III에 해당하는 것으로 추정되는데, 이와 같은 절리암반은 암반등급이 매우 양호하나 혹은 불량하지도 않아서 절리 분포특성에 따른 광산배수의 산성도 변화를 고찰하기 위한 현장 실험 장소로 적합할 것으로 판단된다. 암반 등급이 매우 양호한 경우에는 풍화도가 낮고 절리 발달이 미약하여 비교적 단기간의 현장실험으로 절리 분포에 따른 광산배수의 산성도 변화를 관찰하기 힘들 것으로 사료된다. 또한, 암반 등급이 매우 불량한 경우에는 절리 분포의 불확실성이 커지게 되고 광산배수 산성도에 대한 절리 분포만의 효과를 정량적으로 파악하기위한 현장실험에 어려움이 존재할 수 있다.

이와 같은 선행 지반조사 결과로부터 얻은 현장암반에 대한 정보는 자연수를 주입하고 인위적으로 산 발생을 유도하여 모니터링하기위한 주입공과 관측공의 위치를 계획하는데 있어서 유용한 정보를 제공한다. 본 연구지역에서 제한된 기간 내에 광산배수에 관련된 의미 있는 현장 실험 결과를 얻기 위해서는 주 절리의 주향 방향인 N-E 방향과 이에 수직을 이루며 경사방향의 반대 방향으로 관측공을 설치하는 것이 효과적일 것으로 판단하였다. Fig. 2는 현장실험을 위한 Nx 구경의 주입공 1공과 관측공 3공

Table 1. Summary statistics of fracture geometry parameters estimated from a field scanline survey at the Il-Gwang Mine.

Scanline ID	Set No.	No. of Fractures	Mean Orientation		Spacing(m)		Size(m)	
			dip dir. (°)	dip (°)	mean	std	mean	std
IC1	1	12	150	83	0.14	0.16	1.59	1.81
	2	20	085	79	0.09	0.11	1.37	1.75
IC3	1	12	285	78	0.26	0.25	1.83	0.70
	2	5	350	74	0.24	0.25	0.24	0.15
IC5	1	5	119	77	0.04	0.03	0.54	0.45
	2	13	274	41	0.14	0.06	1.11	0.26

Table 2. Summary statistics of the JRC and JCS distributions obtained from surface outcrops at the Il-Gwang Mine.

Geomechanical Properties	No. of Data	Mean	Std. Dev.	Best Distribution	K-S _{stat}	P-value
JRC	8	9.3	2.6	Normal	0.1456	> 0.2
JCS (MPa)	24	116	71	Normal	0.1096	> 0.2

Note : K-S_{stat} = Kolmogorov-Smirnov goodness-of-fit statistics. A minimum P value of 0.05 is required to accept the probability distribution.

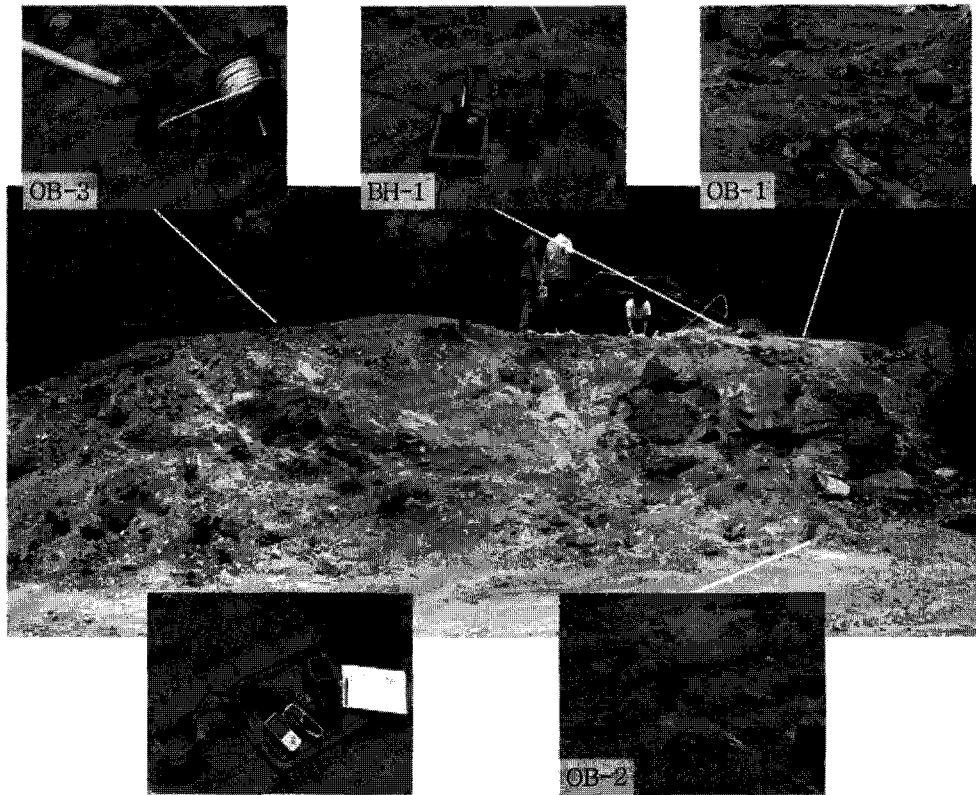


Fig. 2. Photographs of the field experimental site.

Table 3. Specifications of wells at the Il-Gwang Mine.

Well ID	Depth (m)	Well Orientation	Horizontal Distance from BH-1 (m)	Azimuth between BH-1 and Observation Well (°)	Remarks
BH-1	10.7	vertical	-	-	injection
OB-1	11.0	vertical	1.63	3	observation
OB-2	11.2	vertical	4.35	120	observation
OB-3	10.8	vertical	5.90	225	observation

이 시공된 절리암반의 전경이다. 대상암반은 높이 3m, 경사 1:1의 사면을 형성하고 있다. 사면의 상단에는 주입공 1공(BH-1) 및 관측공 2공(OB-1, OB-3)을, 사면 하단에는 관측공 1공(OB-2)을 시공하였다. 이들 중 BH-1, OB-2, OB-3에서는 시추공영상촬영을 수행하여 절리의 방향과 간격에 대한 자료를 취득하였다. 현장실험을 위한 시추공의 제원은 Table 3에 수록되어 있다.

주입공은 중성(pH≈7)의 계곡수를 1일 24 ton 주입하여 지하수위를 관측하였으며, 주입공과 관측공(OB-2)의 지표표고 차이가 3m이므로 이를 고려하여 주입공 상부에서 약 4.5m의 지하수위가 지속적으로 유지되도록 계곡

수가 주입되었다. 이와 같이 산 발생능 조사를 위한 계곡수 주입은 29일 동안 수행되었다. 주입공을 통해 흘러들어난 계곡수는 각각의 관측공(OB-1,2,3)을 통해 모니터링 하였으며 이를 위하여 관측공에서 동시에 주기적인 샘플링을 실시하였다. 관측공을 통해 샘플링한 지하수 시료에 대해서 pH, 전기전도도(electric conductivity, EC), 총용존고형물(total dissolved solids, TDS) 등은 현장에서 즉시 측정하였으며, SO_4^{2-} 농도는 이온크로마토그래피(ion chromatography, IC, 850 Professional IC, Metrohm, Switzerland)를 이용하여 실내에서 측정하였다. Table 4는 측정치의 일부를 수록하고 있다.

Table 4. Measured pH and SO_4^{2-} concentration at the observation wells.

Sampling Date & Time	Well ID	pH	EC ($\mu\text{s}/\text{cm}$)	TDS (mg/L)	SO_4^{2-} (mg/L)
2010. 06. 08 11:00	OB-1	6.9	138.2	68.0	13.5
	OB-2	3.9	598.0	330.0	323.8
	OB-3	6.6	326.0	142.0	35.4
2010. 06. 08 13:30	OB-1	6.8	126.2	63.2	13.6
	OB-2	3.8	682.0	341.0	336.0
	OB-3	6.5	316.0	139.0	38.7
2010. 06. 09 11:15	OB-1	6.9	124.5	62.0	12.8
	OB-2	3.7	720.0	360.0	282.4
	OB-3	6.4	129.8	64.5	32.6
2010. 06. 09 13:30	OB-1	6.6	125.6	62.6	12.9
	OB-2	3.7	630.0	314.0	262.0
	OB-3	6.2	129.1	64.3	34.2
2010. 06. 10 10:50	OB-1	6.6	123.4	61.5	12.6
	OB-2	3.8	667.0	333.0	252.6
	OB-3	6.3	134.7	67.8	32.7
2010. 06. 14 16:45	OB-1	5.0	3.6	153.0	125.3
	OB-2	4.0	685.0	342.0	283.5
	OB-3	5.1	411.0	206.0	198.4

삼차원 절리연결구조

Fig. 3은 삼차원 절리연결구조 모델링 과정의 절차를 나타내는 흐름도이다. 이 연구에서는 지표노두의 선형조사선과 시추공영상촬영에 의한 절리자료를 통합하여 현장 실험 암반을 모사하기 위한 입력자료로 사용하였다. 앞에서 언급하였듯이 절리의 방향성 분석을 위해서는 현장조사를 실시하여 얻어진 절리의 방향자료에 대하여 Mahtab and Yegulalp (1982, 1984)에 의해 제안된 클러스터링 알고리즘을 적용하여 절리군을 구분하였다. Fig. 4는 통합된 절리자료의 방향분포를 나타내고 있다. 절리의 간격과 연장성 분석을 위해서는 각각 선형조사선의 길이 및 노출암반의 형상에 따르는 절리의 간격 및 길에 대한 오차를 보정하고(Kulatilake and Wu., 1984, 1986; Priest and Hudson, 1976, 1981; Sen and Kazi, 1984; Wathugala et al., 1990) 각각에 대하여 추정된 이론적 확률분포에 대하여 Kolmogorov - Smirnov (K&S) 적합성 검정을 수행하였다. 절리자료의 통계분석을 위한 세부적인 절차는 허인실 외(2006)를 참고할 수 있다. Table 5에 요약된 현

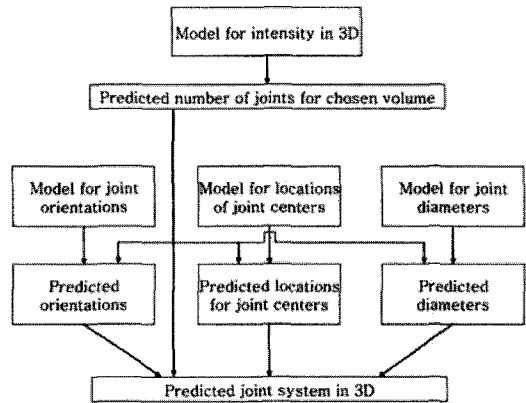


Fig. 3. Flowchart of the stochastic 3-D fracture network modeling.

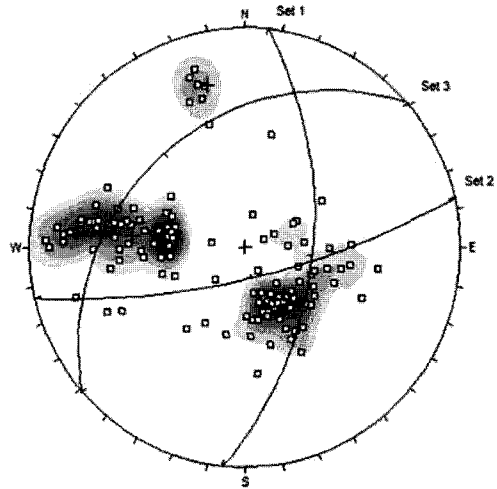


Fig. 4. Orientation distribution of fracture sets at the field experimental site (upper-hemisphere, equal-angle projection).

Table 5. Summary statistics of fracture geometry parameters at the experimental field site.

Set No.	No. of Fractures	Mean Orientation		Spacing (m)		Size(m)		
		dip	dir. dip	mean	std	mean	std	corrected mean
		(°)	(°)					
1	59	276	55	0.28	0.50	0.65	0.36	0.66
2	9	347	74	0.34	0.50	0.27	0.17	0.23
3	63	139	31	0.29	0.36	0.54	0.45	0.57

장실험 암반에 분포하는 절리에 대한 통계분석 결과를 기초로 몬테칼로 모사기법을 사용하여 삼차원 절리연결구조가 구현되었다.

삼차원 절리연결구조의 기하학적 속성을 추계론적 과정으로 구현하기 위해서는 대상 암반에서 구분된 절리군에 대해 단위 체적당 원판형 절리 중심의 개수(3-D 절리 빈도수), 방향분포, 원판형 절리의 크기분포 및 절리의 위치(원판형 절리의 중심)분포 등의 절리 기하학적 모수가 필요하다(허인실 외 2006). 삼차원 절리연결구조를 생성하기위해 추계론적 해석 방법 중 가장 폭 넓게 사용되는 몬테칼로 모사 기법은 절리의 방향분포, 절리간격과 연관된 위치분포, 크기분포에 대한 확률밀도함수를 도출한 후 각각의 확률변수들로부터 난수를 발생시키고 이 난수를 확률밀도함수에 적용하여 삼차원 공간상에 절리를 생성시키는 방법이다. 이를 위해 본 연구에서는 다음과 같은 과정을 수행하였다: (1) 절리의 중심위치를 결정하기위해 직교좌표계에서 각각의 절리군에 대하여 포아송분포를 따르는 난수 R_x, R_y, R_z 를 발생 시키며, 이 때 발생시키는 절리중심의 개수는 3-D 절리빈도수를 따른다; (2) 현장실험 암반에서 구분된 절리군의 방향분포는 기존의 이론적인 방향분포 모델로 적용하였던 피셔분포 및 방행분포 모델이 현장에 적합하지 못하므로 현장의 실제 방향자료를 전체범위로 지정한 후, 임의의 방향자료를 선택하는 방식으로 절리의 수만큼 자료선택을 반복 한다; (3) 절리의 중심위치와 절리의 방향이 결정된 후 원판형 절리의 크기를 결정하기위해 감마분포를 따르는 난수를 발생 시킨다; (4) 현장조사 자료와 비교하여 모사된 절리의 방향, 빈도 및 길이 등의 타당성을 검토한다. 이와 같은 절차로 일평광산의 현장실험 암반에 대한 삼차원 절리연결구조를 15m×15m×15m 영역에 구현한 결과가 Fig 5

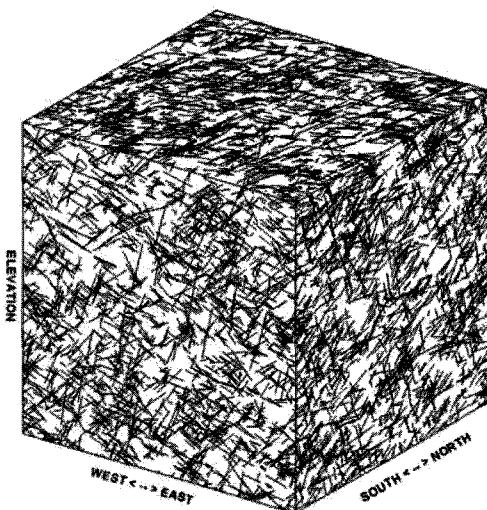
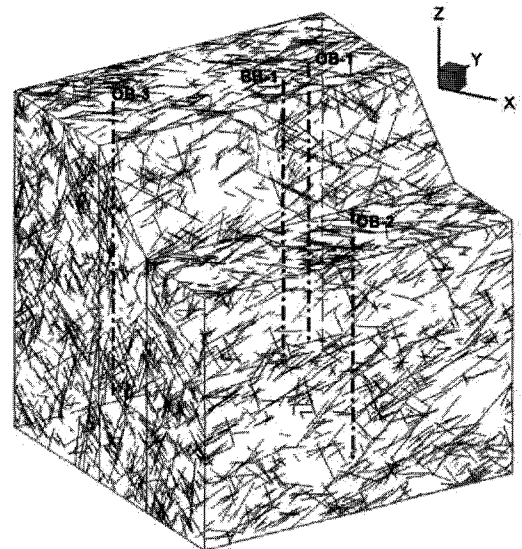


Fig. 5. 3-D fracture network model for a 15 m cube at the Il-Gwang Mine.

에 도시되어 있다.

추계론적으로 모사된 절리연결구조가 실제 암반의 기하학적 구조특성을 현실성 있게 반영하였는지의 타당성 여부를 검토하는 것은 매우 중요하다. 본 연구에서는 지표 노두에서 선형조사선 조사와 시추공영상촬영에 기초하여 현장의 제원에 따라 절리연결구조를 모사한 후 노출된 영역에서 가시화된 절리와 현장조사에 의한 절리의 기하학적 특성을 비교 분석하였다. 또한 수평면의 평면식을 사용하여 수평영역에 절리연결구조를 가시화한 후 나타난 절리선의 주향방향을 이용하여 모사된 절리의 방향성에 대한 타당성도 검토하였다. 시험시공 현장에서 가시화된 절리연결구조 모델이 Fig 6에 도시되어 있다. Fig. 6의 직교좌표계에서 X는 정동 방향이며, Y는 정북 방향이다. 더불어 현장실험을 위한 주입공 BH-1과 관측공 OB-1, OB-2, OB-3의 상대적 위치가 동 그림에 나타나 있다.

Fig 7은 현장 암반의 가시화 영역에 대한 수평 단면도이다. 수평면과 교차하는 절리의 자취선은 절리주향으로 취급될 수 있다. 절리군 1, 2 및 3의 평균 주향방향은 각각 N6°E, N77°E, N49°E로서 이들 방향성이 Fig. 7의 수평



coordinate system: X = East, Y = North, Z = Elevation
 domain : 12m X 12m X 12m
 slope orientation : Dip Direction/Dip = 120°/45°
 slope height : 3m
 BH-1 <-> OB-1 : horizontal distance = 1.63m, azimuth = 003°
 BH-1 <-> OB-2 : horizontal distance = 4.35m, azimuth = 120°
 BH-1 <-> OB-3 : horizontal distance = 5.90m, azimuth = 225°

Fig. 6. 3-D fracture network model for the field experimental site at Il-Gwang Mine.

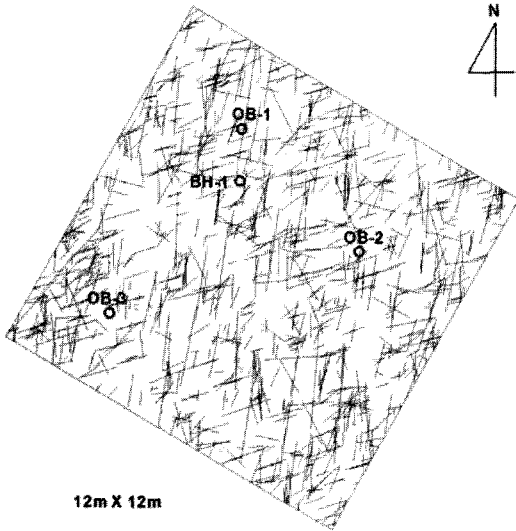


Fig. 7. Plan view of the fracture visualization domain.

가시화영역에 잘 반영됨을 알 수 있다. 평균 주향방향이 N49°E인 절리군 3은 가시화영역에 잘 반영되어 나타나지만 저각의 경사(31°)로 인하여 유사한 평균 절리간격을 갖는 절리군 1에 비해 낮은 개수로 나타났다. 한편 구분된 세 절리군의 방향 변동성이 가시화영역에서 주향방향의 변화로 반영되어 나타남을 인지할 수 있다. 이와 같이 모사된 절리연결구조는 현장에서 조사된 절리의 기하학적 구조특성을 현실성 있게 반영한다고 판단된다.

Fig. 8은 현장실험 암반의 가시화 영역에 대한 사면 주향방향(30°)으로의 수직 단면도이다. 이러한 수직단면의 방향은 주입공 BH-1에서 관측공 OB-1 및 OB-3의 방향과 근사하게 일치한다. 그림에서 GL로 표시한 주입공 BH-1의 수위와 관측공 OB-1 및 OB-3의 상대적인 수위를 살펴보면 BH-1과 근접한 OB-1의 수위는 BH-1의 수위보다 약간 낮음을 알 수 있다. 이는 BH-1과 OB-1의 거리가 1.63m로 상대적으로 가깝기도 하지만 절리의 연결성이 매우 우수한 점에 기인하는 것을 육안으로도 인지할 수 있다. OB-3 역시 OB-1에 비하여 먼 거리에 위치함에도 불구하고 절리의 연결성이 우수하여 주입공인 BH-1과의 수위 차이가 크지 않음을 알 수 있다. 또한, 이와 같은 결과는 절리방향성에 의하여 지하수 이동경로의 연결성이 우수한 점에도 기인한다고 볼 수 있다.

Fig. 9는 현장실험 암반의 가시화 영역에 대한 사면 경사방향(120°)으로의 수직 단면도이다. 이와 같은 수직단면의 방향은 주입공 BH-1에서 관측공 OB-2의 방향과 일치한다. 주입공 BH-1의 수위와 관측공 OB-2의 상대적인 수

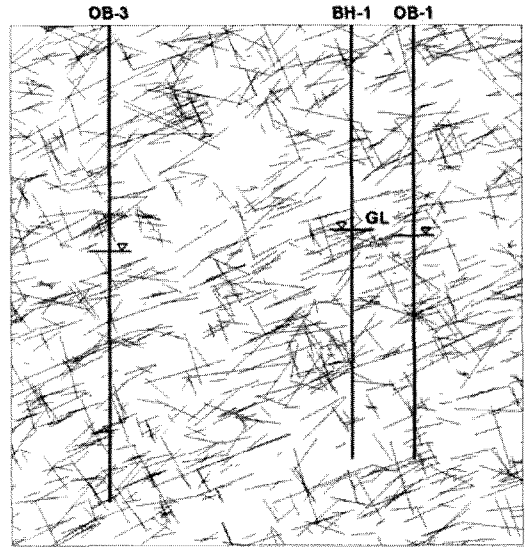


Fig. 8. Fracture traces obtained from fracture generation on a vertical plane (12 × 12 m) with a strike of 030°.

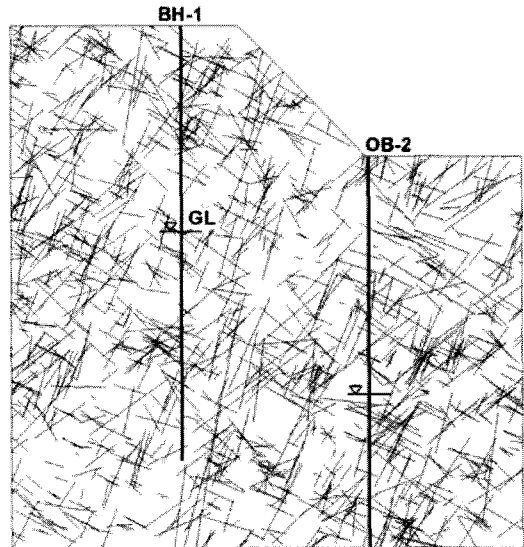


Fig. 9. Fracture traces obtained from fracture generation on a vertical plane (12 × 12 m) with a strike of 120°.

위를 살펴보면 OB-2의 수위가 Fig. 8의 OB-1 및 OB-3의 수위보다 상대적으로 낮음을 알 수 있다. 이는 BH-1과 OB-2의 거리가 4.35m로 OB-3보다 가까움에도 불구하고 절리의 연결성이 매우 취약한 점에 기인하는 것을 육안으로도 인지할 수 있다. 주입공에서 각각의 관측공 방향으로의 1-D 절리밀도(절리개수/단위거리)는 OB-2 방향이 OB-1 및 OB-3 방향보다 높은 것으로 인지할 수 있는데, 이는

주입공에서 OB-2 방향으로의 절리를 따른 광산배수 유동 경로가 상대적으로 복잡할 수 있다는 것을 의미한다. 이와 같이 삼차원 절리연결구조 모델은 대상 지역에서 광산배수 유동에 대한 직관적인 개념을 제공할 수 있는 장점이 있다.

절리구조의 기하학적 특성과 광산배수 산성도의 상관성

앞에서 논의 하였듯이 삼차원 절리연결구조의 가시화는 광산배수의 유동 경로를 정성적으로 제공할 수 있으며 삼차원적 절리구조의 기하학적 특성과 광산배수 사이에는 어느 정도의 상관성이 있는 것으로 판단된다. 따라서 삼차원 절리연결구조의 정량적인 통계적 모수와 광산배수의 산발생 특성과의 상관성을 파악하는 것은 차후 산성배수를 사전에 억제하기 위한 기술 개발에 있어서 주요 핵심요소가 될 수 있다.

절리의 방향성은 경사방향과 경사의 조합으로 결정된다. 절리의 방향성과 광산배수 산성도의 관계를 논의함에 있어서 경사방향과 경사를 함께 고려하여 취급하기에는 어려움이 따르며, 이 연구에서는 절리의 주향방향을 기하학적 모수로 취급하여 광산배수와의 상관성에 대하여 고찰하였다. Fig. 10은 연구지역에서 조사·기록된 절리주향의 빈도수를 로즈다이아그램에 나타낸 것이다. 또한 관측공의 방위각이 동 그림에 표시되어 있다. Table 6은 관측공 방향으로 절리주향의 상대빈도(relative frequency)를 수록하고 있다.

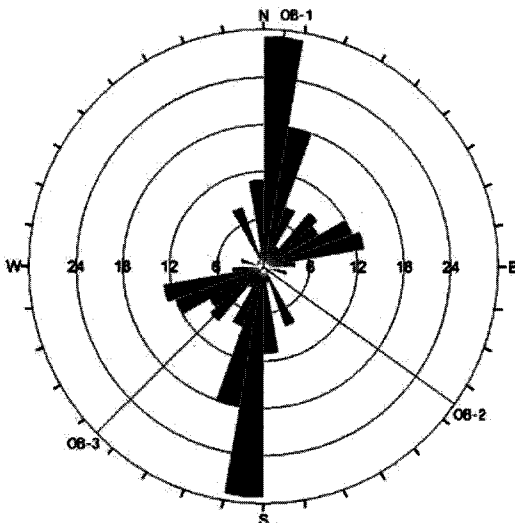


Fig. 10. Rose diagram showing the frequency of fracture strike.

Table 6. Relative frequency of fracture strike and 1-D fracture density to the observation well directions.

Well ID	Azimuth	Relative Frequency of Strike	1-D Fracture Density
OB-1	003°	0.2214	4.0366
OB-2	120°	0.0076	6.3118
OB-3	225°	0.0687	3.3289

관측공 OB-1과 OB-2의 방향은 현장실험 암반에 존재하는 절리의 주향이 각각 최대와 최소 빈도를 갖는 방향과 일치한다. 따라서 광산배수가 절리를 따라 유동한다고 가정할 때 OB-1 방향이 OB-2 방향보다 절리의 연결성이 우수하여 광산배수의 유동성이 양호할 수 있음을 직관적으로도 유추할 수 있다. Fig. 11(a)-(e)는 2010년 6월 8일에서 6월 10일 까지 약 48시간 동안 주입공 BH-1에 일정한 수위를 유지시키면서 3개의 관측공에서 동시에 측정된 pH와 SO_4^{2-} 농도를 나타낸 것이다. Fig. 11(f)는 6월 10일 주입공에서 주입을 멈추고 4일 후 관측공에서 pH와 SO_4^{2-} 농도를 측정된 결과이다. 여기서 가로축은 절리주향의 상대빈도이며 OB-2, OB-3, OB-1 순으로 낮은 값에서 높은 값을 갖는다.

Fig. 11에서 전반적으로 절리주향의 상대빈도가 상대적으로 큰 방향으로의 관측공에서 높은 값의 pH를, 그리고 낮은 값의 SO_4^{2-} 농도가 측정되었다. 전반적인 트렌드는 절리주향의 상대빈도가 증가할수록 pH는 로그함수적인 증가를 보이며 SO_4^{2-} 는 로그함수적인 감소를 나타내며 높은 결정계수의 상관성을 갖는다. 이러한 경향은 절리주향의 상대빈도가 상대적으로 매우 낮은 OB-2 방향으로 절리의 연결성이 취약하여 주입공에서 투입된 중성의 계곡수가 유동하면서 주위 모암과 화학적으로 반응할 수 있는 체류시간이 길 수 있는 데에 기인한 것으로 판단된다. 주입공에서 계곡수의 투입을 멈추고 4일 후 pH와 SO_4^{2-} 의 농도를 측정된 결과인 Fig. 11(f)에서 역시 절리주향의 상대빈도가 높을수록 pH가 로그함수적으로 증가하고 SO_4^{2-} 가 로그함수적으로 감소하였음을 알 수 있지만, 여기서는 주입공에서 일정한 수위를 유지한 이전 결과들과 비교할 때 OB-1, OB-3에서도 pH의 감소와 SO_4^{2-} 농도의 증가를 확인할 수 있다. 이와 같은 결과는 주입공에서 계곡수의 투입이 멈춤과 동시에 주입공의 수위가 점점 낮아지면서 광산배수의 유동속도가 느려지고 주위 모암과 화학적으로 반응할 수 있는 시간이 길어진 것이기 때문인 것으로 판단된다.

현장실험 암반 내에 존재하는 광물 중 수질의 pH 변

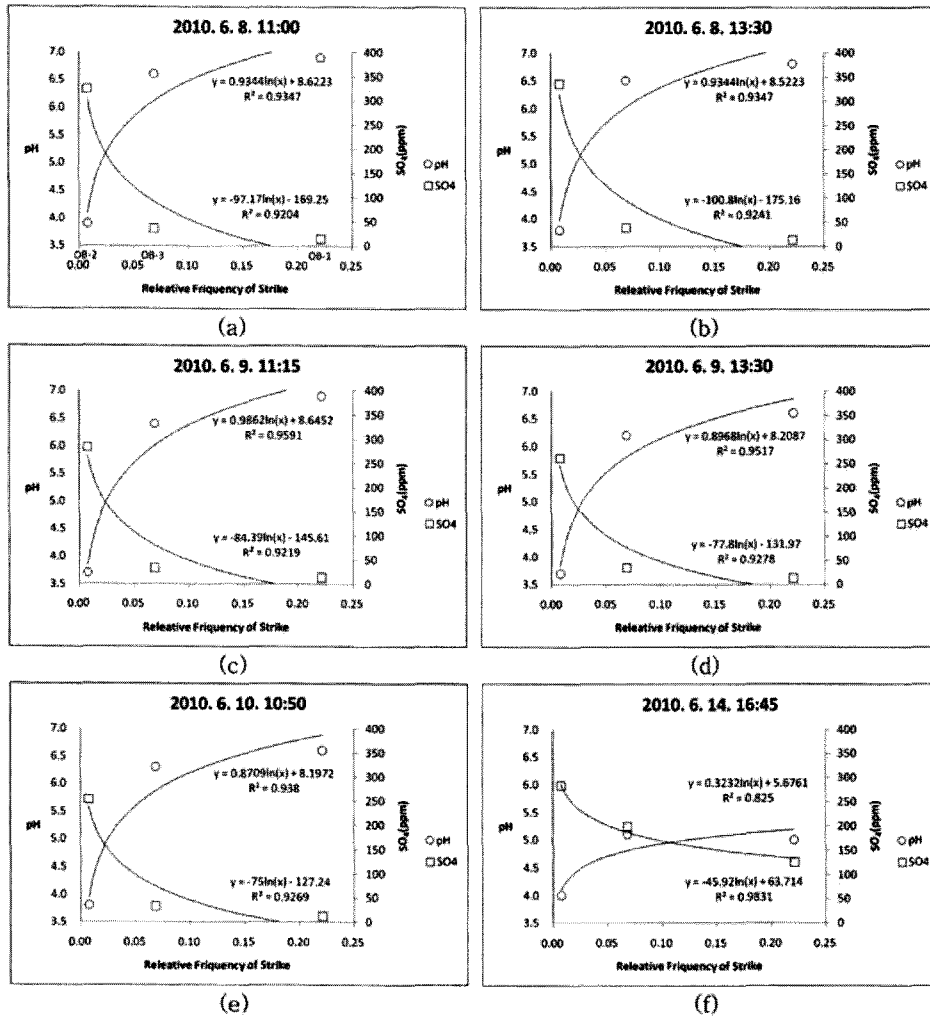
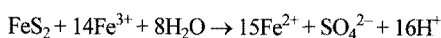


Fig. 11. pH and SO_4^{2-} concentration with respect to the relative frequency of fracture strike.

화와 SO_4^{2-} 농도 변화에 영향을 미치는 주된 광물은 황철석(pyrite, FeS_2)이다. 황철석은 환원환경에서 매우 안정한 광물이나 물, 공기와 접촉하여 산화되면서 H^+ , SO_4^{2-} , Fe^{2+} 를 생산하는 것으로 알려져 있다(Berner, 1967). Fe^{2+} 는 O_2 에 의해서 Fe^{3+} 로 산화되고 수화되면서 많은 양의 산을 발생 시킬 수 있다(Nordstrom, 1982). 지속적으로 발생하는 산에 의해 황철석 표면 부근의 pH가 3.5 이하로 감소 되면 수용액 내 Fe^{3+} 의 활동도가 증가하게 되고 Fe^{3+} 는 다음과 같은 반응으로 황철석의 산화를 유도하여 더 많은 양의 산을 발생 시킬 수 있다(Singer and Stumm, 1970).



일광광산 시험시공 현장암반에서 3개로 구분된 절리군의 절리간격은 각각의 절리군에 대한 평균수선방향으로의 1-D 절리밀도(절리개수/단위길이)를 추정 가능하게 한다. 각각의 평균수선방향으로의 절리밀도를 통합하면 삼차원 공간상에서 임의의 방향에 대하여 1-D 절리밀도를 산정할 수 있다(Sen and Kazi, 1984). Fig. 12는 연구지역에서 구분된 각 절리군의 평균수선방향으로 절리밀도를 계산하고 이를 바탕으로 삼차원 공간에서 선추향 및 선경사를 각각 1° 간격으로 하여 모든 방향에서 산정된 절리밀도를 반구투영도에 나타낸 것이다. 일광광산 현장실험 암반은 주입공을 중심으로 017° (선추향)/ 15° (선경사) 방향으로 2.55 개/m의 최소 절리밀도를 갖으며, 최대 절리밀도는

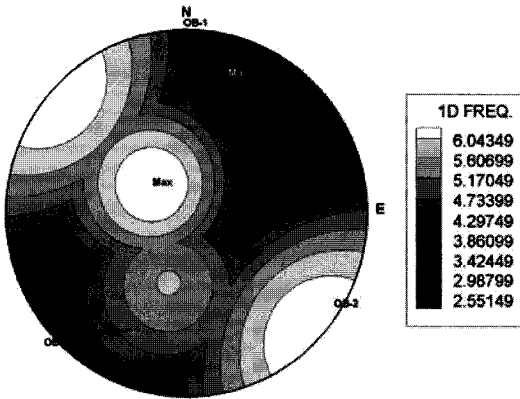


Fig. 12. One-dimensional fracture density distribution in 3-D (upper-hemisphere, equal-angle projection).

309°/64° 방향으로 6.48개/m의 값을 갖는다. 주입공에서 관측공 방향으로 산정된 1-D 절리밀도는 Table 6에 수록되어 있다. Fig. 13은 Fig. 11과 같은 실험 일정으로 3개의 관측공 방향으로 1-D 절리밀도에 따른 pH와 SO₄²⁻ 농도에 대한 측정 결과이다.

3개의 관측공 중 OB-2의 방향이 가장 큰 절리밀도를 갖으며 OB-1, OB-3 방향 순으로 절리의 밀도가 감소한다. Fig. 13에서 가로축은 절리밀도이며 OB-3, OB-1, OB-2 순으로 낮은 값에서 높은 값을 갖는다. 전반적으로 절리 밀도가 상대적으로 큰 방향으로의 관측공에서 낮은 값의 pH를, 그리고 높은 값의 SO₄²⁻ 농도가 측정되었다. 전반적인 추세는 절리밀도가 증가할수록 pH는 음지수함수적인 감소를 보이며 SO₄²⁻는 지수함수적인 증가를 나타낸다.

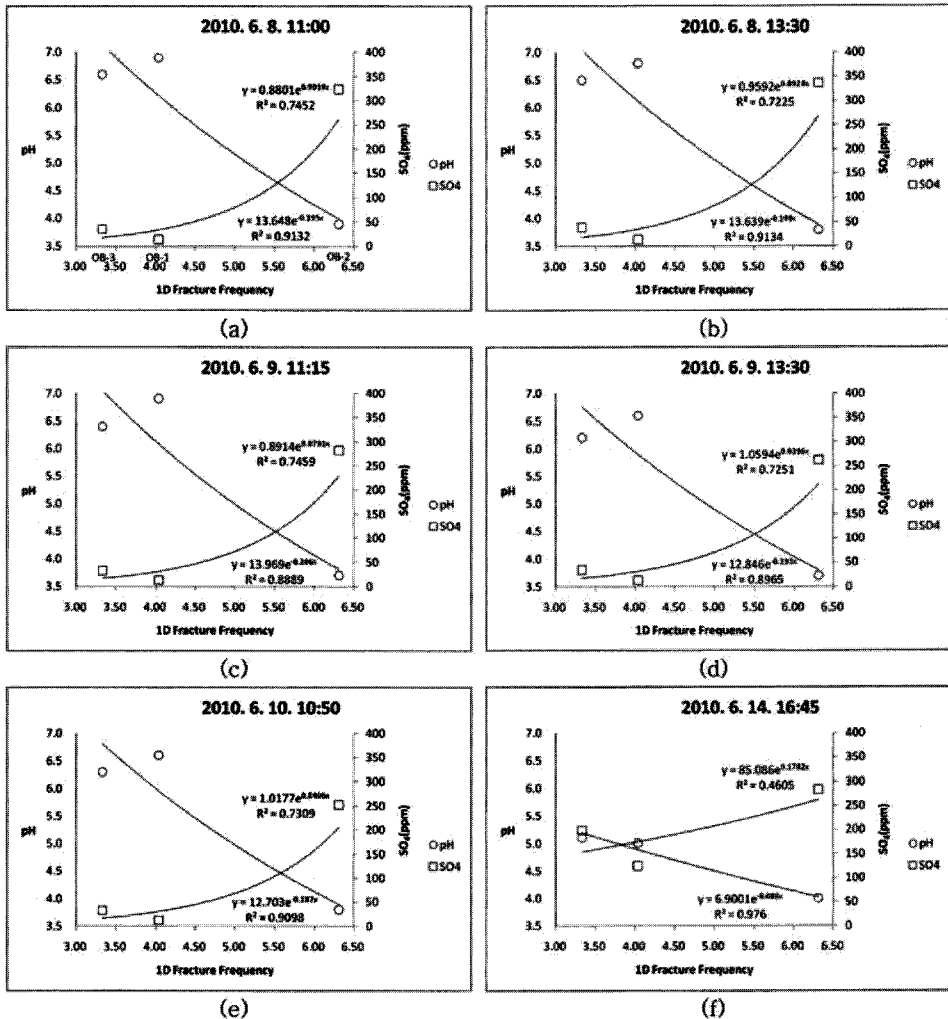


Fig. 13. pH and SO₄²⁻ concentration with respect to fracture density.

결정계수는 앞에서의 절리 주향의 상대빈도인 경우보다 전반적으로 낮게 나타나지만 SO_4^{2-} 의 농도의 경우에는 높은 상관성을 갖는다고 볼 수 있다. 이는 광산배수가 절리를 따라 유동한다고 가정할 때 절리밀도가 큰 방향일수록 광산배수의 경로가 복잡해질 수 있으며 이에 따른 절리암반 내에서 모암과의 접촉부가 증가할 수 있는 것에 기인하는 것으로 판단된다.

결 론

추계론적으로 모사된 삼차원 절리연결구조는 현장암반의 이차원 영역에서 각 절리군에 대한 절리선 구조를 예측하는데 이용될 수 있다. 예측된 절리분포의 타당성을 검토한 결과 현장암반에 대하여 구현된 삼차원 절리연결구조는 현장암반의 절리 분포특성을 잘 반영하는 것으로 해석되었다. 일광광산의 삼차원 절리연결구조 모델은 광산배수 유동에 대한 직관적인 개념을 제공할 수 있으며, 절리연결구조에 따른 절리의 기하학적 모수와 광산배수 산성도 사이에 상관성이 있는 것으로 판단된다. 절리주향의 상대빈도가 상대적으로 큰 방향으로의 관측공에서 높은 값의 pH를, 그리고 낮은 값의 SO_4^{2-} 농도가 측정되었다. 전반적인 추세는 절리 주향의 상대빈도가 증가할수록 pH는 로그함수적인 증가를 보이며 SO_4^{2-} 는 로그함수적인 감소를 나타내며 높은 결정계수의 상관성을 갖는다. 이러한 경향은 절리주향의 상대빈도가 상대적으로 낮은 방향으로 절리의 연결성이 취약하여 광산배수가 유동하면서 주위 모암과 화학적으로 반응할 수 있는 여건이 우세할 수 있는 데에 기인한 것으로 판단된다. 일광광산에서는 전반적으로 1-D 절리밀도가 상대적으로 큰 방향으로의 관측공에서 낮은 값의 pH를, 그리고 높은 값의 SO_4^{2-} 농도가 측정되었다. 전반적인 추세는 1-D 절리밀도가 증가할수록 pH는 음지수함수적인 감소를 보이며 SO_4^{2-} 는 지수함수적인 증가를 나타낸다. 결정계수는 절리주향의 상대빈도를 변수로 사용한 경우보다 전반적으로 낮게 나타나지만 SO_4^{2-} 농도는 1-D 절리밀도와 어느 정도 상관성을 갖는다고 볼 수 있다. 이는 광산배수가 절리를 따라 유동한다고 가정할 때 1-D 절리밀도가 큰 방향일수록 광산배수의 경로가 복잡해질 수 있으며 모암과의 접촉부가 증가할 수 있는 것에 기인한다고 사료된다.

사 사

본 연구는 2010년도 한국광해관리공단의 연구용역인

광산배수 억제기술 개발사업(2G07830)에 의해 수행되었으며 이에 감사드립니다.

참고문헌

허인실, 임정기, 김용필, 김국한, 2006, 부산-울산 고속국도(5공구)에 위치한 암반사면의 추계론적 절리연결구조 모사에 대한 사례연구, 대한지질공학회지, 16(4), 337-349.

Akcil, A. and Koldas, S., 2006, Acid mine drainage (AMD): causes, treatment and case studies, J. Clean. Product, 14, 1139-1145.

Berner, R.A., 1967, Sedimentary pyrite formation: an update, Am. J. Sci., 256, 773-785.

Bieniawski, Z. T., 1979, Geomechanics classification in rock engineering applications, Proc. of 4th Int. Cong., ISRM, Montreux, 2, 41-48.

Kulatilake, P.H.S.W. and Wu, T.H., 1984, Estimation of Mean trace length of discontinuities, Rock Mechanics and Rock Engineering, 17, 215-232.

Kulatilake, P.H.S.W. and Wu, T.H., 1986, Relation between discontinuity size and trace length, Proc. of 27th U.S. Symposium on Rock Mechanics, 130-133.

Mahtab, M.A. and Yegulalp, T.M., 1982, Rejection criterion for definition of clusters in orientation data, Proc. of 23rd U.S. Symposium on Rock Mechanics, 116-123.

Mahtab, M.A. and Yegulalp, T.M., 1984, A similarity test for grouping orientation data in rock mechanics, Proc. of 25th U.S. Symposium on Rock Mechanics, 495-502.

Nordstrom, D.K., 1982, Aqueous pyrite oxidation and the consequent formation of secondary iron materials. In: Hossner, L.R., Kittrick, J.A. and Fanning, D.F. (Eds.), Acid Manipulation of Soil Minerals, Soil Science Society of America Press, Madison, p. 46.

Priest, S.D. and Hudson, J., 1976, Discontinuity spacing in rock, Int. J. Rock Mech. Min. Sci. & Geomech. Abstr., 13, 135-148.

Priest, S.D. and Hudson, J., 1981, Estimation of discontinuity spacing and trace length using scanline surveys, Int. J. Rock Mech. Min. Sci. & Geomech. Abstr., 18, 183-197.

Sen, Z. and Kazi, A., 1984, Discontinuity spacing and RQD estimates from finite length scanlines, Int. J. Rock Mech. Min. Sci. & Geomech. Abstr., 21, 203-213.

Shanley, R. J. and Mahtab, M. A., 1976, Delineation and analysis of centers in orientation data, Mathematical Geology, 13, 9-23.

Singer, P.C. and Stumm, W., 1970, Acidic mine drainage: the rate-determining step, Science, 167, 1121-1123.

Wathugala, D.N., Kulatilake, P.H.S.W., Wathugala, G.M. and Stephansson, O.A., 1990, A general Procedure to correct sampling bias on joint orientation using a vector approach, Computers and Geotechnics, 10(1), 1-31.

2010년 11월 12일 원고접수, 2010년 12월 20일 게재승인

최재영

한국과학기술연구원 천연물소재센터
210-340 강원도 강릉시 대전동 KIST
Tel: 033-650-3701
Fax: 033-650-3729
E-mail: jchoi@kist.re.kr

엄정기

부경대학교 에너지자원공학과
608-737 부산광역시 남구 대연3동 599-1
Tel: 051-629-6559
Fax: 051-629-6553
E-mail: jum@pknu.ac.kr

권현호

한국광해관리공단 광해기술연구소
110-727 서울시 종로구 수송동 석탄회관
Tel: 02-3702-6650
Fax: 02-3702-6749
E-mail: hyho57@daum.net

심연식

한국광해관리공단 광해기술연구소
110-727 서울시 종로구 수송동 석탄회관
Tel: 02-3702-6749
Fax: 02-3702-6751
E-mail: yonsik@mireco.or.kr