

지하공동에 의한 지표침하지역의 지반안정성 평가

권광수¹⁾ · 박연준²⁾ · 신희순²⁾ · 신중호²⁾

Ground Stability Assessment for the Mining Induced Subsidence Area

Kwang-Soo Kwon, Yeon-Jun Park, Hee-Soon Shin and Joong-Ho Shin

ABSTRACT

Surface subsidence is one of the problems caused by mined out caverns. Depending on the geologic conditions and mining methods, subsidence can occur in various forms. This report describes the ground stability assessment for the mining induced subsidence area where unfilled caverns still exist abandoned. Geologic features which could affect the stability of the ground were investigated and all the possible geophysical methods were employed to obtain data that could explain the state of the ground in question. Basic rock tests were conducted from the drill cores and rock mass classification was performed by core logging and borehole camera investigation. Numerical analyses were carried out to predict the ground stability using data obtained by various investigations. The result could have been more reliable if in-situ stress were measured and reflected in the numerical analysis.

1. 서 론

최근 광산들의 잇따른 폐광으로 미충진 채굴적의 붕괴에 따른 지표침하 피해가 곳곳에서 발생하고 있으며, 앞으로도 그 발생빈도가 증가할 전망이다. 이러한 지표침하 사례중 A사에서 발생한 침하는 인명 피해는 없었으나 매우 갑작스레 발생하여 침하지역에 존재하던 지표시설물이 순식간에 함몰되었으며, 차후의 침하에 대한 우려로 한동안 인근지역 주민들을 불안에 휩싸이게 하였다.

침하지역 하부는 우리나라 B 광업회사의 대규모 은광산 개발이 진행되다가 87년도에 채광을 마친 지역으로 총 17개 개발구역중 미처 충진하지 못한 5개 구역이 존재한다. 이중 지표함몰이 발생된 지역 하부에는 100 m 이상의 span을 가진 대공동이 충진되지 않은 채 방치되어 있었다.

이러한 지하채굴로 인한 지표침하는 지하공동의 천반부가 붕락되면서, 그 영향이 지표까지 발전하는 것인데, 이 발전과정 및 영향범위는 공동 상부의 지층발달상태, 공동의 모양, 지압조건 및 지층내부에 존재하는 연약대의 발달상태에 따라 달라지므로, 수식이나 특정이론에 따른 일반적인 평가기준을 마련하기는 매우 어렵다. 외국의 경우 수진기를 대상지역에 다수 분포시켜 놓고, 미소 파열음의 발생빈도 등을 이용하여 지표함몰의 시기 등을 어느 정도 예측하나, 이는 근본적인 방법은 되지 못하며, 많은 비용과 인력이 장기간에 걸쳐 소모되는 단점도 있다.

본 연구에서는 이 5개 위험예상지역에 대하여 지반안정성 평가를 수행하기 위하여 지질, 탐사, 암반공학 및 안전공학의 4개 분야가 공동으로 수행한 연구결과를 주로 암반공학적인 측면에서 기술하고자 한다.

* 1994년 8월 21일 접수

1) 정희원, 한국자원연구소 자원개발연구부장

2) 정희원, 한국자원연구소 자원개발연구부 선임연구원

2. 대상지역의 지질구조

대상 은광산 지역은 약 8 Km의 지름을 갖는 칼데라 최남단에 속한다. 이 지역의 지질은 Pre-Cambrian의 편마암류와 중생대 류라기의 화성암류로 구성되어 있다. 이 가운데 조사지역 내의 지표에서는 용결응회암, 용결응회암의 층간 퇴적암, 그리고 염기성 맥암이 관찰된다. 용결응회암의 지질시대는 화강암과의 관계로 보아 류라기로 추정되며, 1~3 cm 크기의 암편이 약 10% 함유되어 있고 전체적으로 유리질의 화산분출물로 구성되어 있다. 용결응회암이 갖는 welding fabric은 용결 신장된 부석이나, 신장배열을 보이는 샤드에 의해 인지되며 주향은 NS 방향에 60~80° E의 경사를 갖는 solution cleavage가 발달되어 있다. 이들 자료를 종합해 보면 이 광산 부근의 용결응회암은 관입형으로 추정된다.

염기성 맥암은 1~2m의 두께를 가지고 남북 방향의 단층면에 따라 관입하였으며 후에 발생한 단층에 의하여 파쇄되었거나 변위를 보인다. 이 지역의 단층운동 및 응회암의 관입, 광화작용, 염기성 맥암의 관입상을 모식적으로 도시한 것이 그림 1이다.

3. 탐 사

대상지역 하부의 암반상태를 보다 정확하게 파악하기 위하여 가능한 모든 탐사방법이 동원되었다.¹⁾ 2지역은 이미 지표함몰이 일어난 곳으로 암반내부에

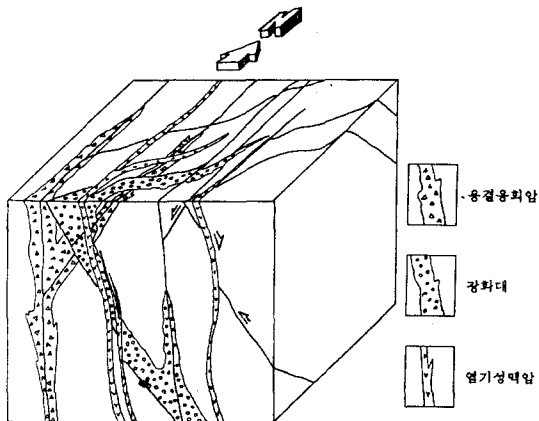


그림 1. 대상지역의 단층운동과 용결응회암의 관입, 광화작용, 염기성 맥암의 관입 모식도

많은 open crack이 발달하였으며, 1지역 역시 파의 전달이 용이치 않아 지표 탄성과 탐사법이 적용되었다. 그림 2는 1지역 및 2지역의 탄성과 탐사 축선을 나타내고 있다.

탐사 결과 L1, L2 및 L3의 축선에 대하여 각각 그림 3, 그림 4 및 그림 5의 해석단면도가 도출되었다.

반면 4지역과 7지역에 대하여는 탄성과 지오토모그래피 기법이 적용되었다. 그림 6은 탄성과 지오토모그래피의 응용을 위한 시추공 위치와 예상단면을 보여주고 있다.

4지역 1단면, 그리고 7지역 3개 시추공간의 3단면에 대하여 토모그래피가 실시되었는데, 7-1과 7-2 사이의 단면은 거리가 멀어 파의 전달이 이루어지지 않았고 나머지 단면에 대해서는 해석결과가 도출되었다.

그림 7은 4지역 해석결과이다. 최대 탄성과 속도 약 5,500 m/sec의 굳은 암반이 대각선 방향으로 존재하며 그 우상부와 좌하부에 이보다 약간 덜 굳은 암반이 둘러싸고 있다. 또한 최하부 공동 근처에도 4,900 m/sec의 상대적으로 탄성과 속도가 낮은 암층이 존재하고 있다. 이 그림은 이 지역의 지질단면도와도 어느정도 일치하는 결과를 보여주고 있다.

그림 8은 7지역 7-1과 7-3 시추공 사이의 해석 단면도이다. 시추공이 충분히 깊지 못하여 공동 천반부까지는 다소 거리가 멀지만 -30 m/ 근처에 탄성과 속도가 매우 낮은 부분이 보이며 그 하부 -65 m/ 근처는 오히려 굳은 암반이 보이고 있다. 이는 공동의 붕괴가 공동천반으로부터 점차적으로 발전하여 지표로 향하는 것이 아니고, 공동상부의 커다란 암괴 전체가 하부로 움직이는 것을 시사할 수도 있어 매우 주목할 만하다. 특히 7지역 상부는 소규모 공장이

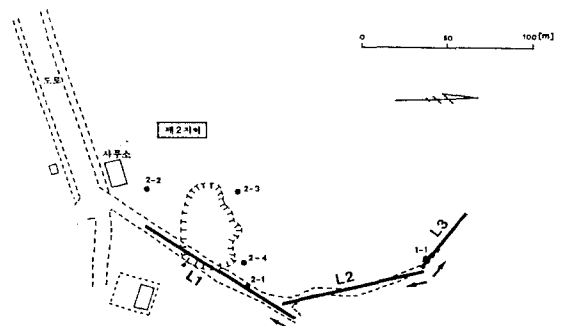


그림 2. 1지역 및 2지역에 대한 탄성파탐사 축선

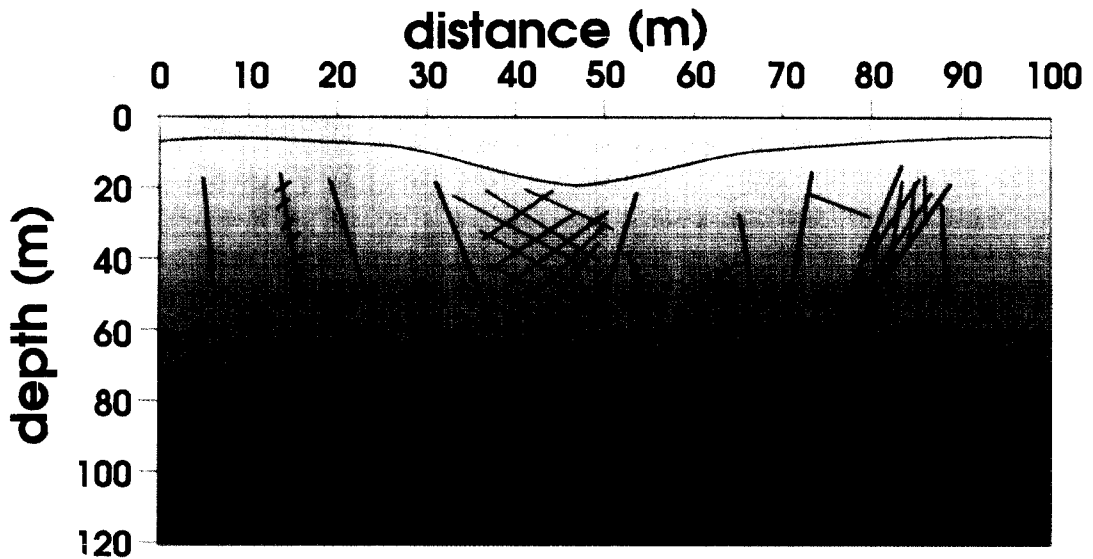


그림 3. L1 축선 해석단면도

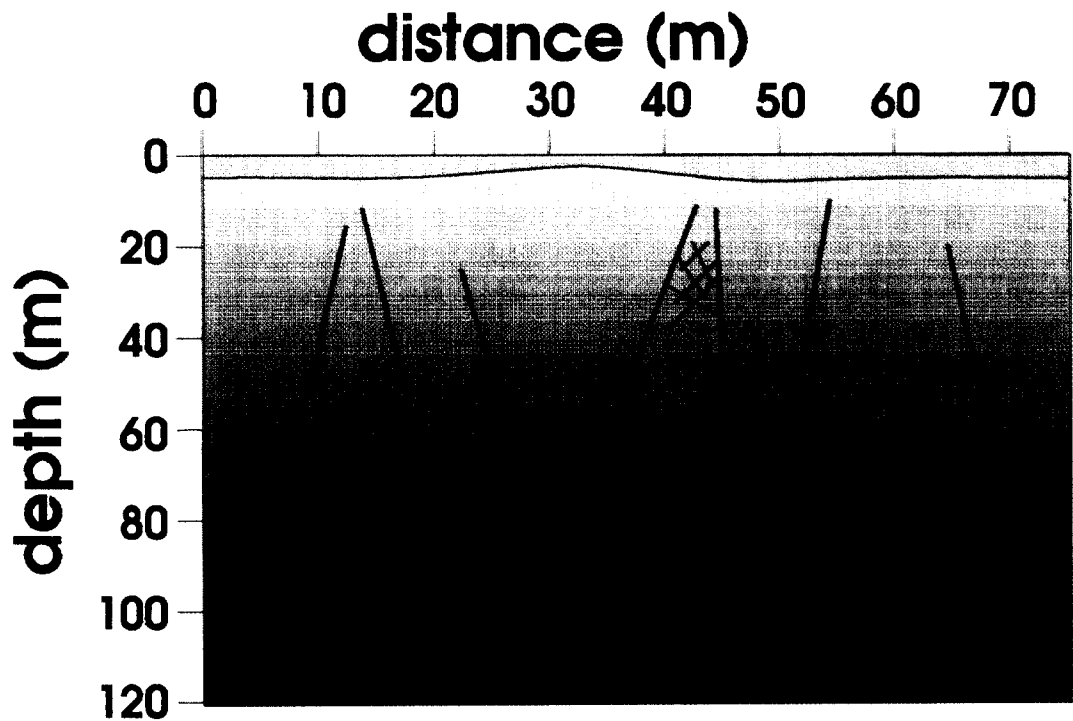


그림 4. L2 축선 해석단면도

집결되어 있어 안전대책을 강구하는 것이 불가피할 것으로 판단된다.

4. 암반역학적 조사

대상지역에 분포하는 암반의 안정성 검토 및 지표 침하 전산해석에 필요한 기초자료로서 대표적인 암석의 물리, 역학적 특성을 파악하고자 실험실 시험을 실시하였다. 시험방법은 미국 ASTM과 국제암반역학

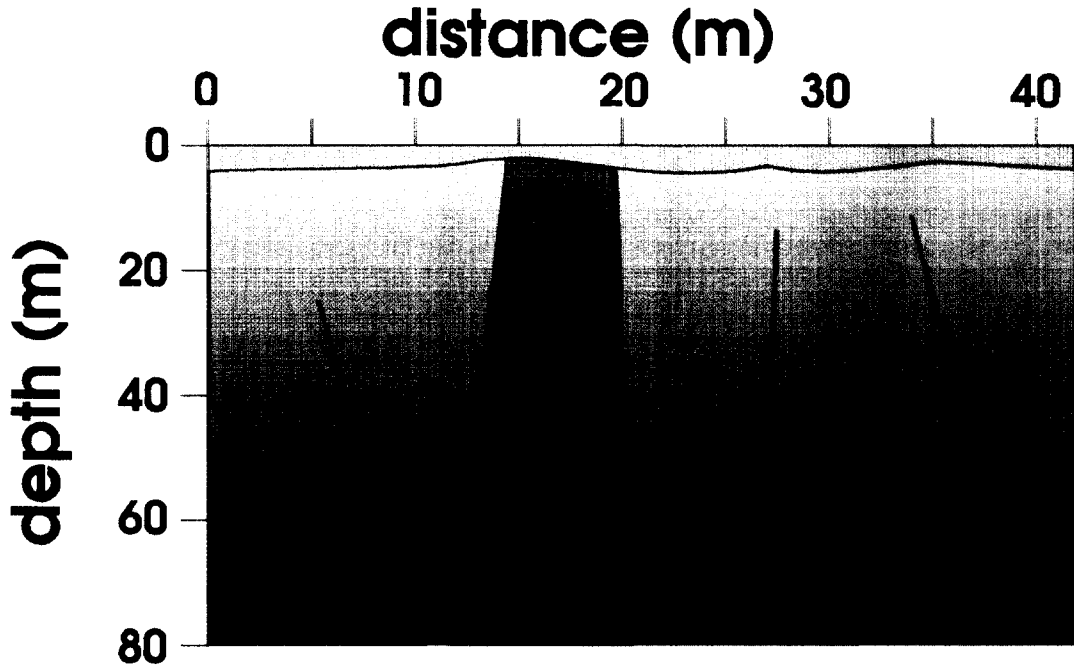


그림 5. L3 축선 해석단면도

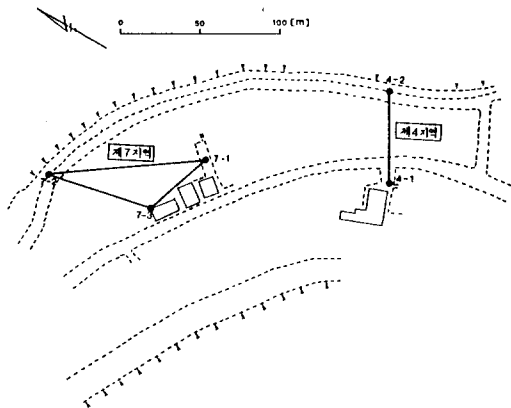


그림 6. 탄성과 지오토크래피 응용을 위한 시추공위치도

회(ISRM, International Society for Rock Mechanics)가 제안한 방법에 준하여 실시하였다.

본 실험실 시험에서 사용한 암석시료는 조사대상 1, 2, 7지역의 대표적 암종을 N.1-1, N.2-1, N.7-2의 3개 시추공의 시추코아 중에서 취하였다. 채취된 시료의 특징은 표 1과 같다.

풍화되고 균열과 연약면의 발달이 심한 암석시료로부터의 시험편 제작은 성공하지 못하였다. N.1-1

시추공의 경우 심도 44 m 이하에서는 암질이 극히 불량하여 코아회수가 불가능하였다. 대표적인 암석의 물리적, 역학적 시험 결과는 표 2와 같다.

1지역 N.1-1 시추공 암석의 압축강도는 250~420 kg/cm²으로 풍화암 등급에 속할 정도로 작게 나왔다. 이는 암석자체는 brittle 하며 매우 견고하지만 잠재 균열을 비롯한 절리가 심하게 발달되어 있어 이것이 강도의 저하에 큰 영향을 미치고 있기 때문인 것으로 판단된다.

심도 68~76 m, 79~82 m의 2개 구간에서는 분말 상태의 slime이 나왔는데 이것은 구멍도의 충전물질로 여겨진다.

구멍도의 상하구간의 암석 회수율은 68 m 직상부에서는 9%, 직하부에서는 5%였고 82 m 직하부에서는 3%로 공동의 직상 및 직하부 2.0 m 이상 떨어진 곳의 코아회수율이 14% 이상인 것으로 미루어 보아 공동 주변 암반이 심하게 균열, 파괴되어 있음을 알 수 있다. 암종은 진한 녹색의 Rhyolite인데 거의 파쇄된 형태로 되어 있다.

심도 100 m 이하의 암반은 BX-casing 삽입작업이 불가능할 정도로 암질이 극히 불량하였다. 68~76 m 구간을 시추할 때는 강한 Air가 시추공을 통해 상부로

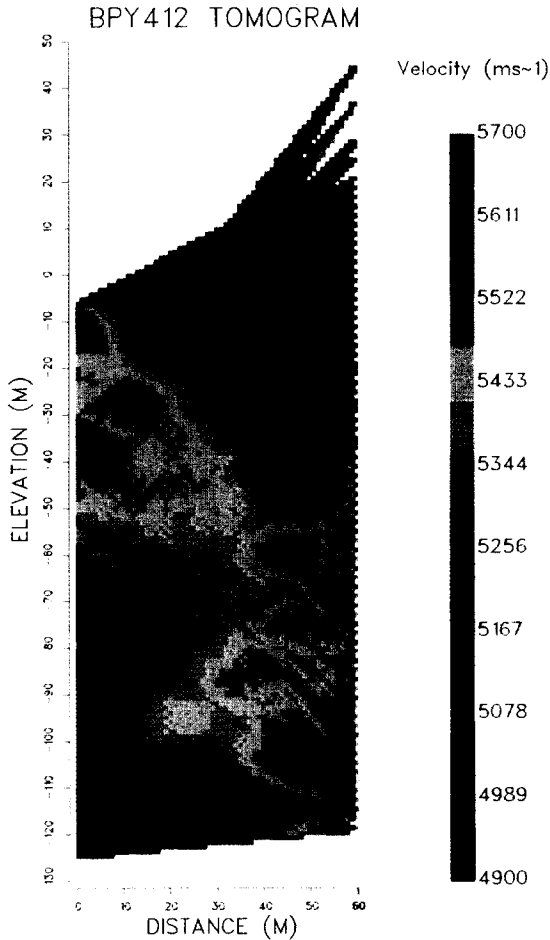


그림 7. 4지역 4-1과 4-2 시추공 사이의 단면에 대한 토모그램

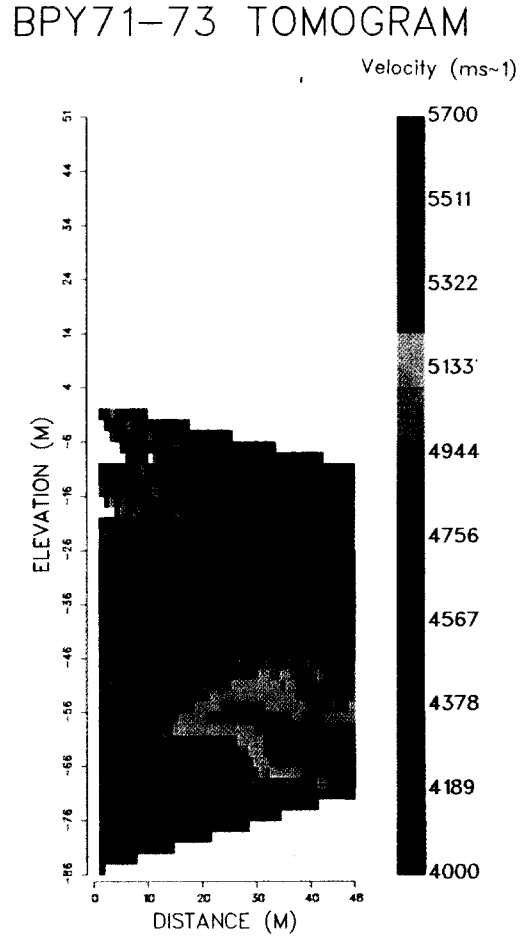


그림 8. 7지역 7-1과 7-3 시추공 사이의 단면에 대한 토모그램

방출되었다가 점차 약해졌는데 이 구간에서의 crack은 공동과 직접 연결된 것으로 판단된다.

2지역 N.2-1 시추공의 90 m 지점에서 채취된 암석의 강도 및 탄성과 속도가 높게 나온 것으로 채취된 시험편이 신선하고 입자가 미세한 brittle한 것이기 때문이며 파괴는 거의 수직적인 형태로 잘게 쪼개졌다.

7지역의 N.7-2 시추공에서 127~127.8 m 구간의 암석이 다른 구간의 암석의 경우보다 탄성과 속도와 압축강도가 매우 높게 나타났다. 파괴형태는 거의 수직으로 잘게 쪼개졌다.

64~68.3 m, 127 m, 139~140 m 3개 구간의 암석의 경우 암석자체는 견고하지만 잠재 균열등 절리가 많이

발달되어 있어 이를 따라 파괴가 진행됨에 따라 압축강도 값이 작게 나타났다.

조사지역 암석의 취성도는 전체적으로 3~10의 경향을 보이고 있다. 특히 N.7-2 시추공의 심도 127~127.8 m에서 채취된 암석은 취성도가 18 이상으로 아주 높게 나타났다.

암석의 경우 구성 광물입자의 크기, 맞물림 정도, 입자 사이의 마찰이 내부마찰각이 되며 구성광물 사이의 결합정도, 미세균열이 존재 정도가 전단강도가 된다. 일반적으로 전단강도가 클 수록 내부마찰각도 커지는 경향을 나타낸다.

표 3은 실험실 시험결과중 단축압축강도와 단축인장강도를 이용하여 Mohr의 직선파괴식에 의거, 심도

표 1. 암석시료의 채취 위치 및 특성

채취위치	심도(m)	암석명	비 고
1지역 N.1-1 시추공	16	Rhyolite	연회색, 치밀한 균열, 잠재균열다량
	25	"	균열
	38	"	암회색, 균열다량
	40	"	"
	44	"	"
1지역 N.1-2 시추공	90	"	회색, 신선, 흰색 띠
	"	"	회색, 신선, 흰반점
7지역 N.7-2 시추공	35.3-38	"	연회색, 신선
	53.7	"	연회색
	64-68.3	"	연황색, 신선, 질리튬 충전물 1 mm, 치밀
	98-101	"	암회색, 유화광물협재
	127-127.8	"	암회색, 신선
	"	"	암회색, 신선, 유화광물 소량함유
	139-140	"	회색, 신선, 석영맥 협재
"	"	암회색, 잠재균열	

표 2. 암석의 물리·역학적 시험 결과

번호	채취위치	밀도 (gr/cm ³)	탄성파속도(m/sec)		압축강도 (kg/cm ²)	인장강도 (kg/cm ²)	탄성계수 (10 ⁵ kg/cm ²)	포아송비
			종파	횡파				
1지역								
N.1-1 시추공								
1	(16 m)	2.59	5,080	1,920	420	—	1.5	—
2	(23 m)		4,770			100		
3	(25 m)	2.59	4,500	1,690	250	—	0.4	
4	(38 m)		4,760			100		
5	(40 m)		4,580			40		
6	(44 m)		5,410			90		
2지역								
N.2-1 시추공								
7	(90 m)	2.71	5,730	2,050	1,560	150	3.2	0.12
7지역								
N.7-1 시추공								
8	(35.3-38 m)	2.58	5,680	2,100	830	90	2.1	0.12
9	(53.7 m)		5,080			70		
10	(64-68.3 m)	2.57	5,200	2,050	200	55	0.2	0.20
11	(98-101 m)	2.76	5,130	1,950	1,120	135	1.8	0.16
12	(127 m)	2.64	4,800	2,060	470	110	1.5	0.10
13	(127-127.8 m)	2.60	5,660	2,410	2,200	120	3.7	0.10
14	(139-140 m)	2.65	5,490	2,380	670	140	1.8	0.24

별로 전단강도와 내부마찰각을 구한 것이다.
시추공 N.1-1의 150 m 구간과 시추공 N.7-2의 140

m 구간의 시추코어를 대상으로 RQD 조사를 실시하였다.

표 3. 암석의 전단강도 및 내부마찰각

시추공	심도(m)	전단강도 (kg/cm ²)	내부마찰각 (°)
N.1-1	0-23	100	38
	25-44	65	36
N.2-1	90	250	55
	35.3-53.7	133	52
	64-68.3	52	36
N.7-2	98-101	195	49
	127	113	37
	127-127.8	270	61
	139-140	155	41

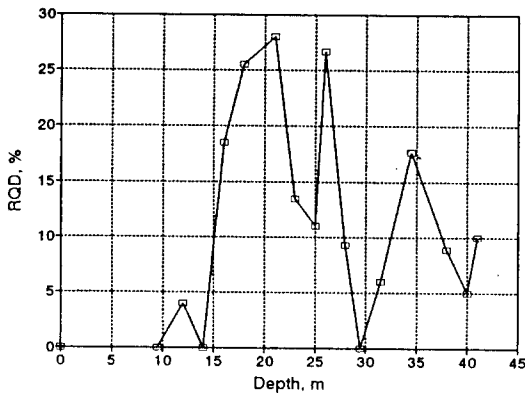


그림 9. N1-1 시추공의 심도별 R.Q.D. 변화

시추공 N.1-1에서는 대부분 RQD가 30% 이하로 암질이 매우 불량(Very poor)-불량(Poor)한 등급에 속하며 매우 불량(Very poor)한 암질이 대부분이다. 암석에 절리가 많으며 파쇄암 상태의 구간이 많다.²⁾

44 m 하부에 시추작업을 할 때는 지하에 있는 구경도와 심한 균열로 인한 누수 현상 때문에 시추비트의 냉각을 위한 물의 순환이 이루어지지 않아 진구간의 코아회수가 극히 부진하였다. 따라서 44 m 하부의 암석의 RQD는 추정할 수 밖에 없는데 누수 현상과 구경도 및 불량으로 인한 암반의 균열 등을 고려할 때 44 m까지의 암반의 RQD 값을 최대치로 보는 것이 타당하리라 판단된다.

시추공 N.7-2에서는 일부 구간에서 양호(Good)한 암질이 제한적으로 나타나고 있으나 대부분은 불량(Poor)-매우 불량(Very poor)한 등급의 암질상태를

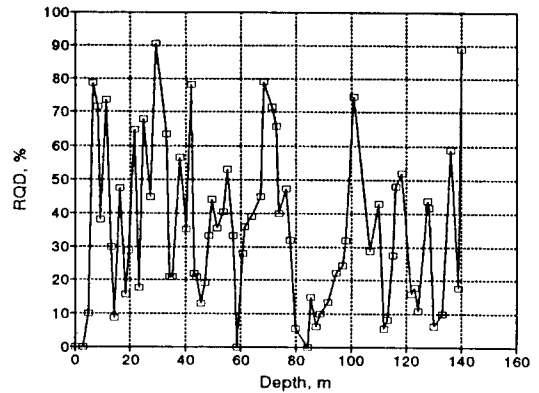


그림 10. N7-2 시추공의 심도별 R.Q.D. 변화

보이고 있다. 시추공 N.1-1의 경우와 비교하여 암질은 조금 양호한 편이다.

각 시추공에 대한 심도별 RQD 조사 결과들은 그림 9 및 그림 10 에서 보는 바와 같다.

1지역의 N1-1 시추공과 7지역의 N7-1 시추공에 대하여는 시추공내 촬영조사가 실시되었다.³⁾ 각 시추공에 대한 공내촬영조사와 코아분석결과가 표 4 및 표 5에 비교, 요약되어 있다.

5. 전산해석에 의한 안정성 평가

이상의 지질, 탐사 및 암반공학적 조사자료를 토대로 채굴공동의 붕괴여부 및 공동의 붕괴가 지상에 미치는 영향을 조사하기 위하여 전산해석을 실시하였다. 해석에 사용된 program은 미국 Itaska Consulting Group Inc.의 Peter Cundall박사에 의해 개발된 FLAC이다. FLAC은 운동방정식을 기초로 하여 개발된 유한차분법을 이용한 구조해석 프로그램인데, 토질, 암반 등 지반공학 분야의 문제를 풀기 위해 개발되었다.⁴⁾

5.1 입력자료

해석에 필요한 입력자료는 현장탐사 및 지형도, 지질단면도, 그리고 지질조사, 탐사 및 암반공학적 자료가 종합적으로 이용되었다. 4절에서 기술된 바와 같이 현장에서 시추를 통하여 얻어진 core는 대체로 불량하였고, 따라서 상당히 낮은 RMR 값을 보였다. 시험편 자체도 대부분 core의 종방향으로의 crack을 함유하고 있는 경우가 많았다. 그 결과 시험편에 따라

표 4. N.1-1 시추공의 코어분석자료 및 공내사진촬영결과

심도	코어 Logging 자료	시추공 사진촬영	
		심도별 특징	전체적 상태
0 m	표토층		
15 m	Rhyolite	-15 m부터 큰 절리가 많고, 부서진 곳도 나타남	-촬영 전구간에 걸쳐 경사절리가 많이 존재 -천부구간에서는 일부 지표수가 절리를 통해 공내로 유입
30 m	Clay Zone Rhyolite 변질	-40 m부터 전체적으로 부서져 형태유지 안됨	
45 m	Clay Zone Rhyolite	-48 m부터 공벽이 크게 부서져 공동형성된 곳이 많음	
60 m	이 하부는 코어회수불량	-67 m에서 지하수면 나타남	-지하수면 하부구간에서는 물이 많은 구간과 혼탁한 구간이 구분되어 나타남
75 m	시추시 공내로 공기방출	-75~81 m에서 카메라장비 몇번 걸림	
90 m	Rhyolite		-지하수면하부는 비닐등 시추 때의 물질이 많이 떠 있어 공벽형태를 가림
105 m	Rhyolite	-109 m에서 공벽이 무너져 공동형성	
120 m	사질화코어, 탈색변질 Rhyolite	-110 m부터는 시추공 상태가 불량해 이 하부로는 카메라 장비를 내릴 수 없어서, 촬영하지 못함	
135 m	-Rhyolite 압편회수 -굴진속도로 보아 파쇄 구간 추측		
150 m	-코어회수 불능		

강도값의 차이가 매우 컸으며, 7지역의 경우 심도에 따라 압축강도가 무려 10배 이상 차이가 나는 등 일관성 있는 대표값을 찾기가 매우 어려웠다. 또한 암반의 경우 암반자체의 강도 및 변형계수는 실험실 시험결과보다 매우 작아지는 경향이 있어 실험결과로부터 현지 암반의 강도를 추정하기가 어려웠다. 본 연구에서는 이러한 상황을 고려하여 시험결과에서 평균치를 취하지 않고 중간값에 가까운 값을 취하여 RMR 값을 참조로 Hoek과 Brown에 의해 제안된 암반강도 추정식에 의거하여⁵⁶⁾ 단축압축강도 및 단축인장강도를 구하고, 이로부터 Mohr-Coulomb 파괴 조건식에 필요한 내부마찰각과 전단강도를 계산하였다. 이렇게 1, 2 및 7지역에 대하여 결정한 강도 para-

meter는 표 6과 같으며, 이의 타당성 검증은 위하여 이미 지표함몰이 발생한 2지역에 대하여 강도 parameter를 변화시켜 가며 해석을 수행한 결과, 이 값은 2지역의 공동붕락을 야기시키는 최대값과 매우 가까웠다. 시추자료가 없는 4지역과 5지역에 대하여는 지질조사 결과를 바탕으로 지질조건이 가장 유사한 지역과 동일하게 하였다. 지압조건은 실제 측정된 바 없기 때문에, 수직성분은 자중으로, 수평성분은 해석 구간의 좌우측경계에서 횡변위를 구속하는 경계조건을 부과하였다.

5.2 해석결과 및 고찰

5.2.1 1지역

표 5. N.7-1 시추공의 코어분석자료 및 공내사진촬영결과

심도	코어 Logging 자료	시추공 사진촬영	
		심도별 특징	전체적 상태
0 m	표토층	-3 m까지 Casing	-촬영전구간에 걸쳐서 절리의 규모가 크고, 벌어져 있음
15 m	Rhyolite 탈색변질	-완경사 절리가 뚜렷하고, 하부에는 경사가 큰 절리도 많아짐	-절리를 따라 공내로 지표수의 유입이 많음
30 m	Rhyolite		
45 m	파쇄 코어 Rhyolite	-42~48 m에서 보다 심함	-공벽의 절리입구가 부서진 곳이 많음
60 m	파쇄 코어 Tuff, Xenolith Clay화	-58 m에서 지하수면 나타남	-지하수면 하부구간은 시추 때의 기름이 섞여 있어서, 공벽촬영이 불가능함
75 m	Clay		
90 m	코어회수 불량 Chloritization	-기름층으로 인해 90 m 하부는 더 이상 촬영하지 않았음	
105 m	파쇄코어, 유리질화		
120 m	Joint 많음		
135 m	Rhyolite		
140 m	Rhyolite 탈색변질		

1지역에는 천부에 3개, 심부에 4개의 채굴적이 존재하였으나, 천부에 위치하는 3개의 채굴적은 충진되었고, 심부의 채굴적들은 충진되지 않은 상태이다. 이미충진 채굴적들은 약한 dyke 내부 및 인접 지역에 존재하고 있으며, 공동우측 대각선 방향으로 강한 관입암층이 뻗어 있다. 하부공동들의 좌측과 관입암층 우측으로 비교적 소규모의 단층이 약 75°의 경사로 존재하고 있다. 이러한 지질조건을 단순화하여 유한 차분해석을 위한 요소망을 구성한 것이 그림 11이다. 단층은 규모도 작고 거의 수직으로 서 있기 때문에 수평과 수직이 주응력방향인 경우 큰 영향을 미치지 않을 것으로 판단되어 전산해석에는 고려하지 않았다.

주요지질구조 및 공동은 'x'로 표시되어 있다. 이 요소망은 공동을 중심으로 수평거리 600 m, 수직거

리는 해발고도 -400 m까지 고려하고 있어 해석지역 주변의 지형 및 지질학적 특성이 충분히 반영되도록 하였다. 1개 요소의 크기는 약 5 m×5 m 정도의 크기로 하여 작은 공동 및 얇은 암맥 등도 모델링이 가능하도록 하였고, 총 10,000여 개의 요소로 구성되어 있다.

초기 공동개착 이전 중력에 의한 평형에 도달한 후, 공동을 개착하여 다시 평형상태에 도달할 때까지 대략 9,000 단계의 계산이 요구되었다. 그림 12는 응력해석결과로부터 Mohr-Coulomb 파괴조건식에 의거하여 공동부근 암반의 파괴여부를 판정한 것이다. 최하부 공동의 천반은 단층인장으로 파괴되었으며, 공동하반도 부분적으로 인장에 의한 파괴를 보이고 있다. 따라서 이 공동은 붕괴되고, 공동바닥도 반팽에 의해

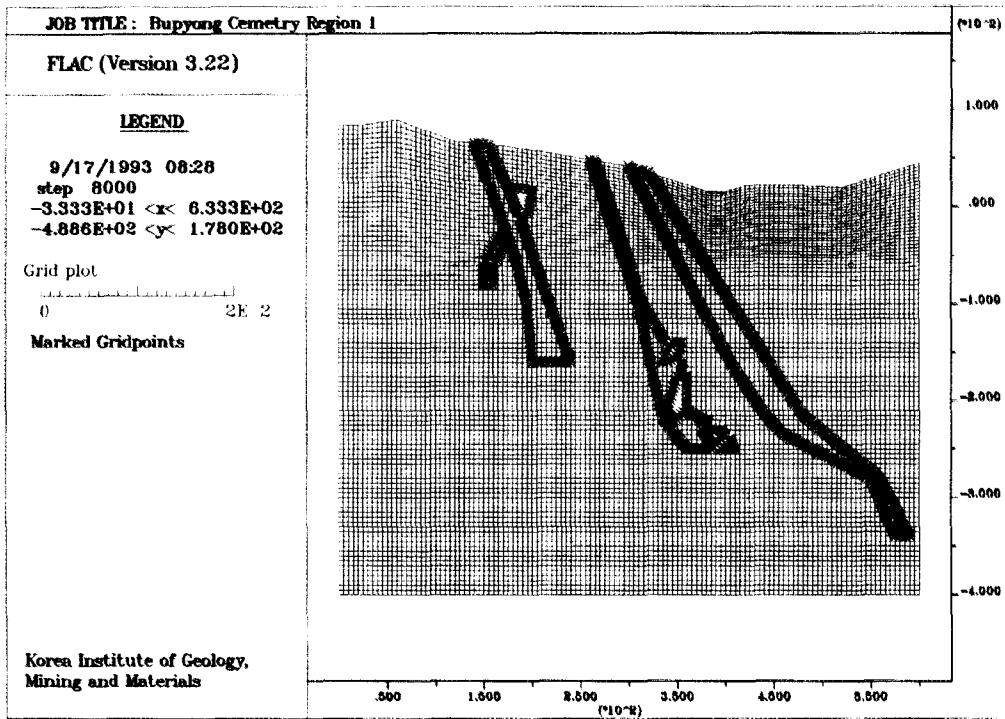


그림 11. 1지역 해석을 위한 요소망

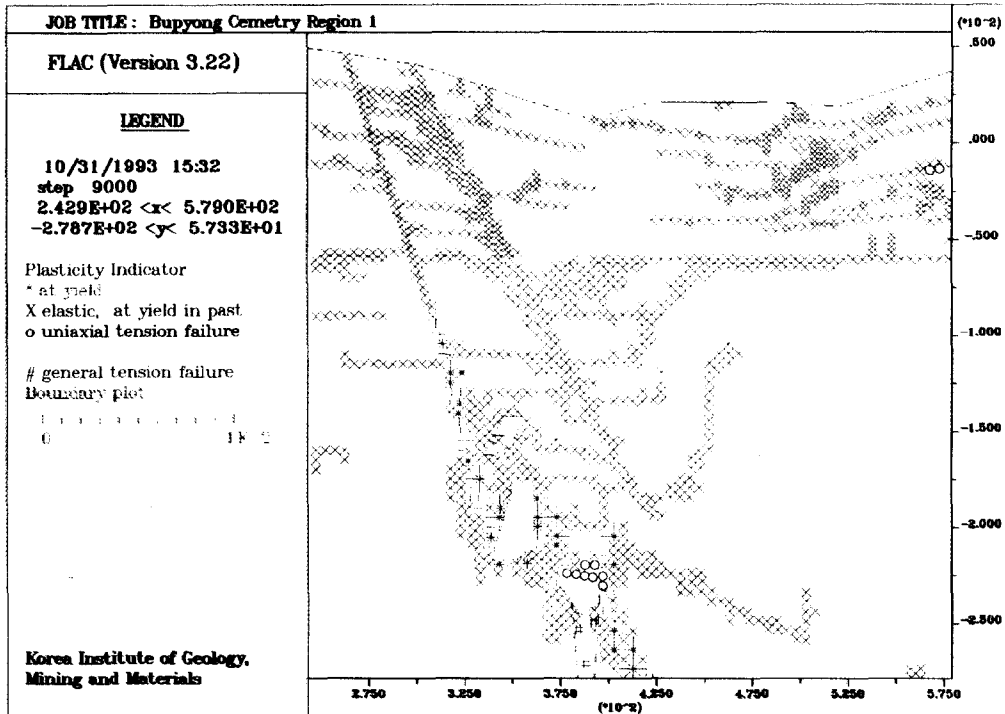


그림 12. 1지역 공동 주변에서의 파괴영역 분포도

표 6. 전산해석에 사용된 지역별 강도 및 변형계수

지역	지질구조 구분	밀도	강도 parameter	변형계수 parameter
1	암반	2.6	$C_0=1$ MPa $T_0=0.5$ MPa $\phi=37^\circ$	$G=0.435$ GPa $K=0.476$ GPa
	약한 Dyke	2.6	$C_0=0.5$ MPa $T_0=0.25$ MPa $\phi=30^\circ$	$G=0.2$ GPa $K=0.25$ GPa
	강한 Dyke		$C_0=2$ MPa $T_0=1$ MPa $\phi=40^\circ$	$G=0.9$ GPa $K=1.0$ GPa
2	암반	2.7	$C_0=2$ MPa $T_0=1$ MPa $\phi=40^\circ$	$G=0.87$ GPa $K=1$ GPa
	약한 Dyke	2.7	$C_0=0.5$ MPa $T_0=0.25$ MPa $\phi=30^\circ$	$G=0.2$ GPa $K=0.25$ GPa
	강한 Dyke	2.7	$C_0=4$ MPa $T_0=2$ MPa $\phi=40^\circ$	$G=1.7$ GPa $K=2$ GPa
7	암반	2.6	$C_0=0.8$ MPa $T_0=0.25$ MPa $\phi=40^\circ$	$G=0.8$ GPa $K=0.9$ GPa
	약한 Dyke	2.6	$C_0=0.2$ MPa $T_0=0.125$ MPa $\phi=30^\circ$	$G=0.4$ GPa $K=0.45$ GPa
	강한 Dyke	2.6	$C_0=1.6$ MPa $T_0=1$ MPa $\phi=40^\circ$	$G=1.6$ GPa $K=1.8$ GPa
	단층		$C_0=0$ $T_0=0$ $\phi=30^\circ$	
4	7지역과 동일하게 가정			
5	1지역과 동일하게 가정			

용기되어 매몰된 가능성을 시사하고 있다. 반면 상부의 3개 공동은 공동 좌측부의 dyke와 근접하였음에도 불구하고 전단파괴만 발생하여, 비록 파괴는 되었으나 마찰에 의한 지지력으로 공동측벽의 부분적인 이탈로 공동의 폭만 약간 증대될 뿐, 공동 자체는

유지하고 있음을 보인다. 최악의 경우는 가운데 큰 공동과 최하부 공동사이의 암반이 파쇄되어 하부공동으로 유입되면서 span이 큰 공동을 형성하게 되는 것인데, 이 경우 최하부 공동의 크기와 암석의 부피 팽창을, 그리고 지표로부터의 심도등을 고려할 때 붕괴에 의한 지표에서의 영향은 없을 것으로 판단된다. 그러나 상반의 붕괴가 대공동과 상부의 얇은 dyke를 따라 일어날 경우 그 영향은 지표로까지 나타날 수 있다.

5.2.2 2지역

2지역은 지표함몰을 유발시킨 문제의 대공동이 지하 200 m에 존재하는 곳으로, 대공동의 수평 span은 약 100 m에 달한다. 또한 지질조건도 좋지 않아 대공동을 중심으로 좌우측에 큰 규모의 연약층이 존재한다. 반면 공동 우측에는 60° 의 경사로 강한 암층이 관입하여 있다. 이 강한 암층은 지표에서는 확인하기 어려웠으나, 갱내에서는 해발 -150 m에서까지 확인되었으며, 이것이 갑자기 사라졌다고 단정하기는 어려워 -160 m에서의 방향을 지표까지 연장시켜 모델링하였다. 전산해석에 사용된 요소망은 그림 13과 같다.

자중에 의한 평형에 도달한 후 공동을 굴착하여 해석을 진행한 결과 공동 좌상부의 심한 인장 파괴로 해석은 평형에 도달하지 못하였다. 그림 14는 공동 굴착으로 인하여 발생한 파쇄영역을 도시한 것인데 공동천반부는 전부 인장파괴를 보이며, 공동좌측의 약한 암층을 따라 인장파괴영역이 확장되고 있음을 보이고 있다. 따라서 이 지역의 암반은 낙반되거나 open crack이 산재하였을 것으로 판단되어, 이 부분을 제거하고 다시 해석을 계속한 결과 그림 15에 도시된 바와 같이 공동직상부의 암괴가 양쪽의 약한 dyke 면을 따라 하부로 이동하면서 -25 m에서 -50 m까지의 구간이 인장파괴 되어있음을 나타내고 있다.

인장영역이 이렇게 상부에 발달하게 된 원인은 좌측 dyke의 허리부분이 굵어있기 때문인 것으로 판단되며, 이로 인하여 파괴영역이 공동의 천정부로부터 차례 차례 상부로 성장하지 못하고, 중앙에서 끊어지는 형상을 하게 된 것으로 생각된다. 실제로는 이 경우 인장파괴 영역의 우측으로부터 crack이 발생하며 공극이 생성되어, 이 공극을 채우기 위해 강한 관입암 부근의 암반이 공동 우측의 dyke 쪽으로 이동하면서 관입암이 파괴될 가능성이 많다. 이렇게 될 경우 함

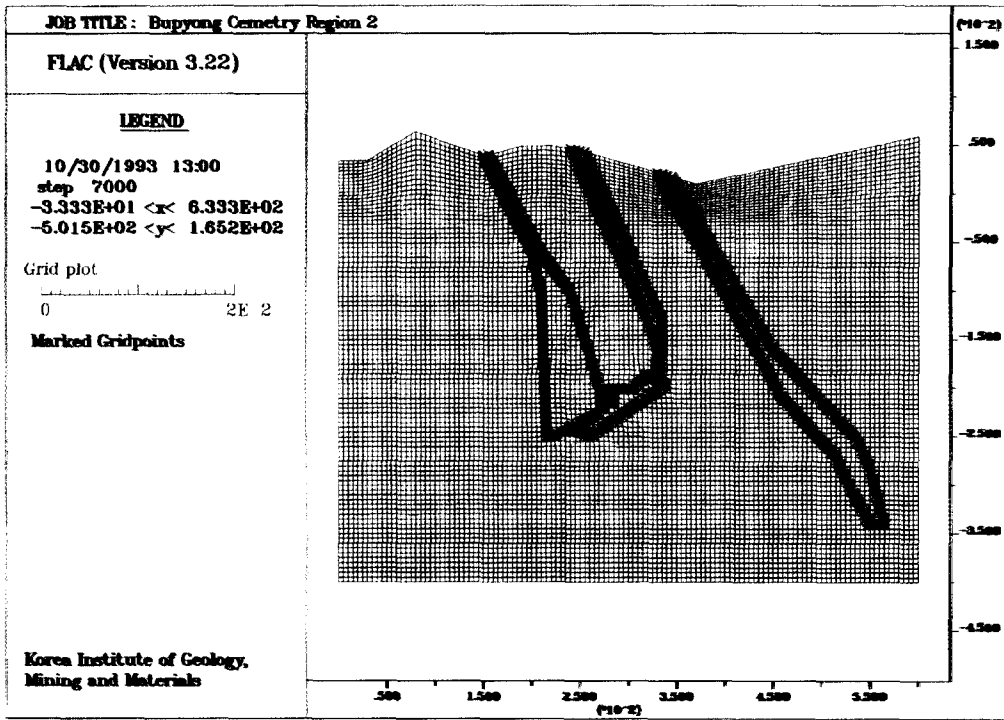


그림 13. 2지역 해석을 위한 요소망

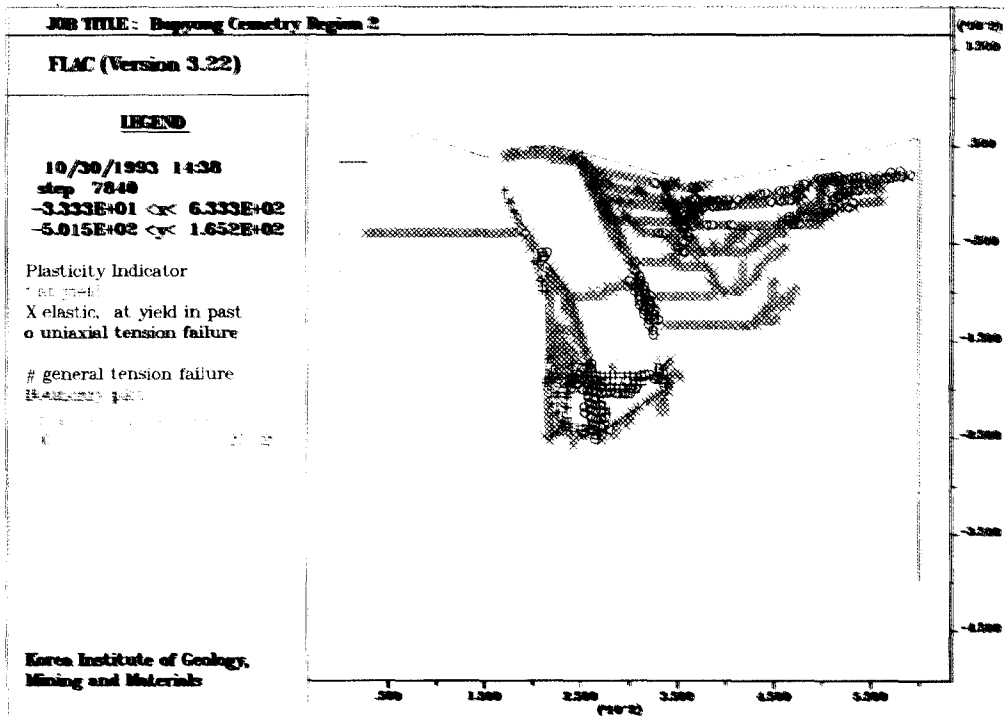


그림 14. 2지역 공동주변에서의 파괴영역 분포도

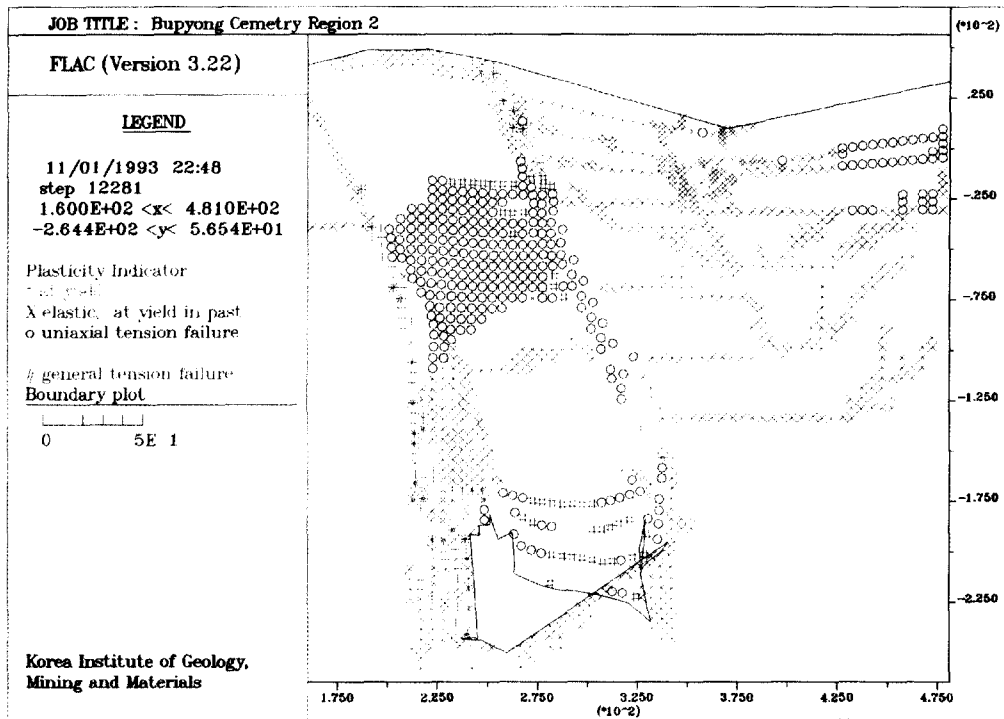


그림 15. 2지역 공동주변에서의 파괴영역 분포도 (공동천반부 인장파괴부분 제거 후 계속 진행한 결과)

물지역 부근에서 대규모 지표함몰이 일어날 수 있을 것으로 판단된다. 그림 15에서 공동의 상반이 밀려 들어와 마치 하반으로 들어간 것처럼 변형한 것은 FLAC이 연속체 모델이라 초기에 주변 요소와의 연결상태만 입력되어 있을 뿐, 공동경계 반대편과의 접촉여부에 관한 정보는 없기 때문이며, 해석의 진행상태로 보아 더 이상의 해석진행은 무의미하다고 판단되었다. 이 경우 공동의 천정 및 천정상부의 커다란 암체가 계속 하부로 움직이고 있어 불평형력을 0으로 수렴치 않고 큰 값을 유지하면서 진동하고 있었다.

5.2.3 4지역과 7지역

4지역과 7지역은 매우 인접해 있기 때문에 두 지역을 한꺼번에 해석하였다. 4지역에서는 지하 약 200 m 부근에 커다란 단일공동이 존재하고 지하 140 m 지점 근처에 2개의 작은 공동이 존재한다. 또한 대공동 우측으로 약 50°의 경사로 강한 층이 존재하며 좌우로 65° 정도의 경사를 가진 단층이 존재하고 있다. 2개의 작은 공동중 오른쪽 공동의 우측에 2개의 단층이 교차하는데 지오토모그래피결과 이 부근의

암반이 매우 불량한 것으로 판정되었기 때문에 교차하는 2개의 단층 사이의 암반은 약한 암반층으로 모델링하였다. 또한 좌우측의 단층은 연속체절리모델(ubiquitous joint model)을 사용하여 단층면을 따라 미끄러짐 및 개구가 가능하도록 하였다. 요소망은 그림 16과 같다.

해석결과로부터 파괴영역을 구한 것이 그림 17에 도시되어 있다. 좌우의 단층은 미끄러짐을 보이고 있으며 7지역의 우측공동 천정부에 인장파괴가 발생하였고, 4지역 공동의 공동내부 돌출부가 인장파괴된 것을 제외하면 특별히 위험한 부분은 없는 것으로 판단된다. 지오토모그래피결과 7지역은 매우 불량한 것으로 나타났으며, 7-2시추공의 RQD분포(그림 10)도 매우 변화가 심한 것으로 보아 이 지역은 지질구조의 변화가 매우 심한 곳으로 판단되어 7지역은 상세조사가 필요할 것으로 판단된다.

5.2.4 5지역

5지역은 지표부근에 대단히 큰 채굴적이 있었으나 워낙 천부이기 때문에 채광과 동시에 추진하였고, 해발 -250 m 및 -300 m 부근에 2개의 작은 공동이

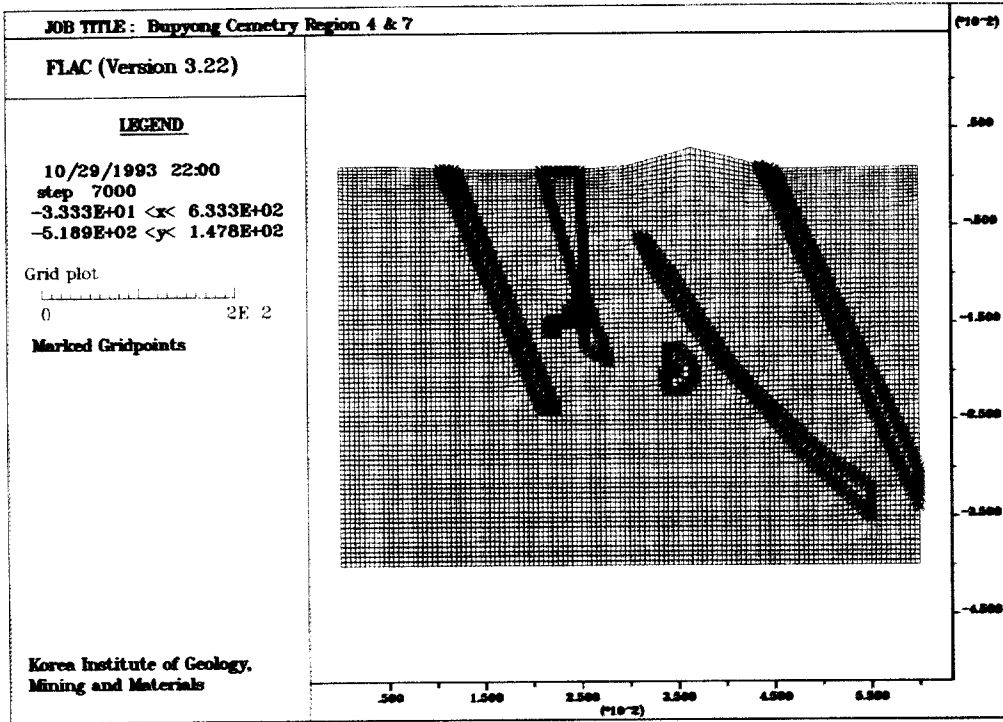


그림 16. 4지역 및 7지역 해석을 위한 요소망

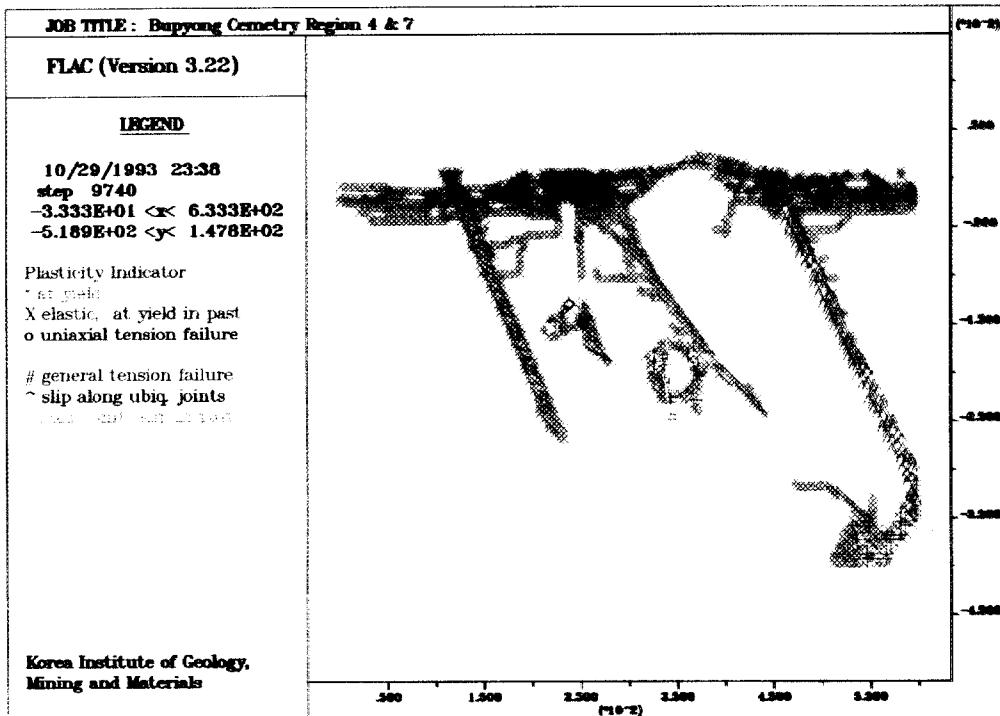


그림 17. 4지역 및 7지역 공동주변에서의 파괴영역 분포도

존재할 뿐이다. 지질조건도 비교적 간단한 편이었다. 따라서 해석결과도 특별히 위험한 요소를 발견할 수 없어 본 보고에서는 생략하기로 한다.

6. 결과 검토

6.1 1지역

1지역에 대하여는 시추자료분석, 암석물성시험, 시추공 촬영조사가 실시되었고, 이 자료를 토대로 전산해석을 실시하였다.

이 지역은 채굴적이 지표로부터 140 m 이상의 심부에 존재하고 그 체적도 큰 것은 아니지만 3개의 채굴적이 연결되어 있고 주위 암반도 연약한 구조선이 발달되어 있을 뿐만 아니라 좌우 양측에 매우 연질의 dyke가 판입되어 있으며 전산해석 결과에서도 이 지역 중앙에 위치한 공동과 그 하부 공동사이의 암반이 파쇄되어 하부 공동방향으로 붕괴 가능성이 있는 것으로 나타났다.

암석물성 시험 결과에서도 심도 100 m와 60~70 m 암반의 암석시료와 RQD가 매우 불량한 상태이고, 시추공내 TV Camera 촬영 결과에서도 시추공의 불안정 상태를 볼 수 있었으므로 이 지역의 지반은 불안정한 것으로 생각되어 충전 등 적절한 안전조치가 이루어져야 할 것으로 판단된다.

6.2 2지역

2지역은 지표함몰 후 함몰부분을 원상복구한 지역으로 시추코아에 대한 암석물성시험과 탄성파탐사, 그리고 전산해석을 통한 안정성 평가가 실시되었다. 탄성과 지오토모그래피도 시도되었으나 파의 전달이 이루어지지 않아 실패하였다. 전산해석결과 하부암괴가 공동쪽으로 이동하면서 파쇄대가 지표 근처까지 발달하였다. 따라서 이 지역은 채굴적으로부터 지표까지 붕락된 것으로 판단되며, 지난 번의 지표함몰로 일단은 평형에 도달하였을 것으로 보이나, 채굴적이 완전히 채워졌다고 판단되지는 않으므로 계속적인 주의가 요망된다.

6.3 4지역

4지역에는 탄성과 지오토모그래피와 전산해석이 수행되었다. 이 지역의 채굴적은 체적이 꽤 큰편이지만 지하 200 m 이상의 깊이에 위치하고 있고 암

반상태가 매우 양호하였으며 전산해석결과도 불안정한 요소를 발견할 수 없어 지반안정성에는 문제가 없는 것으로 판단되었다.

6.4 7지역

이 지역에는 3개의 시추공을 이용하여 탄성과 지오토모그래피조사, 시추공 촬영조사, 코아자료분석조사, 암석물성조사 및 전산해석에 의한 안정성 평가가 수행되었다.

탄성과 지오토모그래피 조사에 의하면 지표로부터 약 60 m 깊이까지 파의 전달이 이루어지지 않았고, 그 하부도 견고한 암반 상부에 약한 암반이 얽혀 있는 상태를 나타내고 있다(그림 8 참조). RQD의 변화도 구간에 따라 매우 심하였으며(그림 10 참조), 실험실 시험결과도 강도 및 변형계수의 변화가 매우 심하였다(표 2 참조). 또한 시추공 촬영조사도 이와 비슷한 결과를 나타내어 비록 전산해석에 의한 안정성 평가 결과 위험요소가 별로 없었으나, 이는 현지의 지질 및 암반조건을 충분히 반영치 못한 것으로 사료되므로 해발 -100 m 지점부터 지표까지의 구간에 대한 암반의 정밀검토가 요망되며, 지반의 안정을 유지할 수 있는 보강조치가 요망된다.

7. 결 론

본 연구는 지하공동에 의한 지표침하 예상지역에 대하여 지반안정성을 다각적으로 검토하고, 대책수립 시 설계기준을 마련하기 위하여 수행되었다. 상세한 지질조사를 통하여 역학적으로 영향을 줄 수 있는 지질학적 특성들이 규명되었고, 가능한 모든 방법의 탐사기법이 적용되어 공동천반의 붕락으로 인한 균열대 및 연약대가 발견되었다. 지반상태에 대한 기초자료를 얻기 위하여 시추에 의한 코어자료분석 및 R.Q.D.산정 그리고 암석역학적 물성시험이 행하여졌고, 시추공내 촬영조사로 인하여 공벽상태가 촬영조사되었으며, 시추공 부근의 암반상태가 추정되었다. 또한 지질, 탐사, 암석역학적인 조사결과로 수집된 자료들을 분석하여 현지의 지질조건, 공동의 위치 및 모양등을 가능한 정확히 모델링하여 안정성 판단을 위한 전산해석을 실시하였다. 이미 지반이 붕락된 지역에 대하여 해석한 결과 지하공동 천반의 붕락과정과, 붕락지역이 지표로 확장되는 양상을 비교적

정확하게 보여주었으며, 타 침하 예상지역에 대한 해석도 7지역을 제외하고는 다른 조사결과와 일치하는 경향을 보여주었다.

개발구역에 대한 개발상황도와 지질, 지형도, 그리고 침하이론 등을 기초로 하여 위험지역의 선정이 행하여 졌으며, 지질, 탐사 및 암반공학적인 조사를 토대로 최종 안정성 평가가 실시되었다.

본 연구에서 사용된 해석기법 및 측정장비들은 세계적으로 첨단에 속하는 것으로써 이 분야의 기술적인 수준을 대변한다고 말할 수 있다. 그러나 탐사분야에 있어서의 단면폭의 한계, 수진기의 민감도 및 signal과 noise의 분리해석문제, 그리고 전산해석에 사용되는 입력자료의 결정, 실험실 시험결과로부터 현지암반의 물성을 추측하는 합리적 방법등은 개선의 여지가 많이 남아 있는 부분이며, 3차원적인 문제를 2차원으로 해석함으로써 발생하는 오류 등은 아직도 해결해야 할 과제로 남아 있다. 또한 지하공동으로 인한 지반 안정성에 대한 현지 지압의 영향은 그 절대적인 크기가 아니고 방향과 수평수직압의 비율이므로 정확한 해석을 위해서는 이론식에 의한 산출보다는 현지 초기지압을 측정하여 해석에 반영시키는 것이 반드시 필요하다.

참 고 문 헌

- 1) 김종렬, 장현삼, 김유성, 현해자, 김기석, 1993, "지오토모그래피에 의한 암반구조 연구 III", 한국자원연구소 특정연구사업보고서.
- 2) Bieniawski, Z.T., 1989, "Engineering Rock Mass Classifications", John Wiley & Sons, 251 p.
- 3) 신중호, 신희순, 최성웅, 이희근, 1994, "수압파쇄를 이용한 초기지압측정과 기존경사균열의 영향", 터널과 지하공간, Vol. 4, No. 1, pp. 55-62.
- 4) Cundall, P.A., 1976, "Explicit Finite Difference Methods in Geomechanics", Numerical Methods in Engineering, Preceedings of the EF Conference on Numerical Methods in Geomechanics, Blacksburg, Virginia, Vol. 1, pp. 132-150.
- 5) Hoek, E. and E.T. Brown, 1988, "The Hoek-Brown Failure Criterion-a 1988 Update", Rock Engineering for Underground Excavation, Proceedings of 15th Canadian Rock Mechanics Symposium, Toronto, October, pp. 31-38.
- 6) Hoek, E., 1990, "Estimating Mohr-Coulomb Friction and Cohesion Values from the Hoek-Brown Failure Criterion", Int. J. Rock Mech. Min. Sci. & Geomech. Abstr., Vol. 27, No. 3, pp. 227-229.