

발파진동에 의한 절리암반 지하공동의 낙석발생 예측에 관한 수치해석적 연구

김현수¹⁾, 김승곤²⁾, 조상호^{2)*}

Numerical Study for Prediction of Rock Falls Around Jointed Limestone Underground Opening due to Blast Vibration

Hyon-Soo Kim, Seung-Kon Kim, Sang-Ho Cho

Abstract Recently, transition from open pit to underground mining in limestone mines is an increasing trend in Korea due to environmental issues such as noise, dust and vibrations caused by crushers and equipment. The severe damages in the surrounding rock mass of underground opening caused by explosive blasting may lead to rock fall hazards or casualties. It is well known that variables which mainly affect blast-induced rock falls in underground mining are: blast vibration level, joint orientation and distribution and shape of the cross sections of underground structures. In this study, UDEC program, which is a DEM code, is used to simulate blast vibration-induced rock fall in underground openings. Variation of joint space, joint angle and joint normal stiffness was considered to investigate the effect of joint characteristics on the blast vibration-induced rock fall in underground opening. Finally, jointed rock mass models considering blast-induced damage zone were examined to simulate the critical blast vibration value which may cause rock falls in underground opening.

Key words Distinct element method, Underground opening, Rock fall, Joint, Blast induced damage zone

초 록 최근 석회석광산은 분진·소음 등 환경적인 문제와 함께 석회석 품위 저하 현상으로 갱내 채광이 증가하고 있다. 석회석을 파쇄시키기 위한 파쇄 시설을 갱내 설치하려면 대규모 지하공동이 필요하게 되며, 공동의 규모가 커짐에 따라 낙석이나 낙반의 발생 가능성이 높아지게 된다. 그리고 석회석 지하공동 주변 암반은 다양한 절리가 발달하여 낙석 발생에 영향을 미치는 것으로 알려져 있다.

본 연구에서는 채광 발파 시 대형갱도 내 낙석발생 여부 관찰과 발파진동 계측을 수행하여, 이를 바탕으로 불연속 수치해석 소프트웨어인 UDEC를 이용하여 절리암반 동해석 모델을 제안하고 발파진동 여기에 의한 대형 지하갱도의 낙석 발생을 해석하였다. 또한 절리암반 모델에 다양한 절리특성(경사각, 간격)의 변화와 발파굴착 손상영역을 고려하였다.

핵심어 개별요소법, 지하공동, 낙석, 절리, 발파손상대

1. 서 론

일반적으로 대규모 석회석 광산은 노천채광법이 적용되고 있으나, 최근 석회석의 품위 저하와 파쇄시설, 운반과정에서 발생하는 분진, 소음 등에 의한 환경적인 문제가 대두되어 파쇄시설을 지하로 이동시키는 사례가 증가하고 있는 상태이다. 석회석의 파분쇄에는 죠크라서, 콘크라서 등 대형장비가 사용되고 있

¹⁾ 전북대학교 자원·에너지공학과 공학박사

²⁾ 전북대학교 자원·에너지공학과 교수

* 교신저자 : chosh@jbnu.ac.kr

접수일 : 2016년 9월 27일

심사 완료일 : 2016년 9월 28일

게재 승인일 : 2016년 9월 29일

며 지하광산 내에 설치하기 위해서는 수십 미터의 높이와 폭을 필요로 하게 된다. 이러한 지하공동 주변암반에 발달된 절리의 분포특성은 공동의 안정성에 영향을 미치게 된다. 권민혁 외(2016)는 채굴공동이 대형화할수록 공동주변 암반의 굴착 손상영역이 안정성에 미치는 영향이 커질 수 있다고 보고하였다. Zhao 외(2015)는 근접발파로부터 전파된 지반진동이 기설터널의 안정성에 미치는 영향을 동해석 기법으로 평가하였다. 그 결과 발파진동 속도수준은 터널 안정성에 미치는 영향이 크다는 것을 보고하였다. Deng 외(2014)는 절리암반 터널을 대상으로 발파진동에 의한 안정성 해석을 수행하여, 터널 주변암반의 발파 손상영역 발생은 현지암반의 초기응력 상태와 발파진동 환산거리가 밀접한 관계가 있다는 것을 밝혔다.

본 연구에서는 석회석광산의 대형 지하갱도 안정성 확보를 목적으로 채광발파 시 낙석발생 여부 관찰과 발파진동 계측을 동시에 수행하여, 이를 절리암반 동적 안정성해석에 반영하여 낙석발생 한계 진동속도 수준을 분석하였다. 절리의 분포특성이 천반의 낙석발생에 미치는 영향을 살펴보기 위하여 수치해석 암반모델의 절리 경사각과 절리 간격에 변화를 주었다. 또한 발파 손상영역을 고려한 절리암반 모델을 제안하고 낙석 발생이 가능한 지반진동 입자속도의 한계를 분석하였다.

2. 석회석 채석발파 진동계측

석회석 파쇄장비를 설비하기 위하여 설치된 대형

지하공동을 대상으로 채광발파 시 대형갱도 내 낙석 발생 여부 관찰과 발파진동계측을 수행하였다. 파쇄 시설 지하공동의 폭은 12m이고 높이는 8m인 직사각형에 가까운 단면형상으로 굴착되었다. 지하공동 측벽을 대상으로 불연속면 조사를 수행한 결과, 3개의 절리군이 관찰되었으며 공동 축방향의 절리군 경사각은 대략 60°~84°의 급경사를 보였으며, 평균 절리간격은 약 6m로 분석되었다. 발파진동 시간이력은 파쇄설비 지하공동의 바닥 면에서 설치한 진동센서를 이용하여 측정되었으며, 지하공동 내 낙석을 관찰하기 위하여 고해상도 비디오카메라와 조명을 설치하였다. 표 1은 채광발파 지점과 측정과의 거리, 지발당 장약량, 최대진동속도, 환산거리를 보여주고 있다. 즉 채광발파 지점과 파쇄설비 지하공동과의 이격거리는 최소 70m에서 최대 270m가 된다. 이격거리는 갱내 3차원 지형모델을 이용하여 추정한 직선거리이다. 그림 1은 표 1에 해당되는 채광발파 시에 계측된 진행방향 진동속도 시간이력을 나타내고 있다. 측정된 진동속도 시간이력 곡선은 3장에서 소개하는 절리암반 모델의 동적해석에서 사용된 발파진동 입력데이터이다.

그림 2는 표 1에서 보여준 발파진동 계측데이터를 대상으로 진동속도와 환산거리의 관계를 보인 것이다. 낙석은 최대진동속도가 대략 5cm/s 이상에서 발생하고 있음을 보여주고 있다. 이러한 수치는 일반적으로 알려진 낙석발생 한계 진동속도와 비교하여 낮은 수치로서, 실험대상 파쇄설비 지하갱도 굴착 시 제어발파가 적용되지 않았으며, 부석 제거가 완벽히 되지 않았던 암반상태와 연관이 있어 보인다. 살펴보면,

표 1. 발파진동 계측조건 및 측정결과

Number	Distance (m)	Charge weight (kg/delay)	PPV (mm/s)	SD (m/Kg ^{1/2})
1	180	13.4	2.13	49.10
2	254	22.8	3.03	53.19
3	204	21.9	4.08	43.62
4	270	19.4	5.06	61.35
5	70	12.8	6.11	49.57
6	200	21.4	7.03	43.28
7	170	44.8	7.84	25.40
8	134	20.0	9.00	29.96
9	104	23.8	10.00	21.32

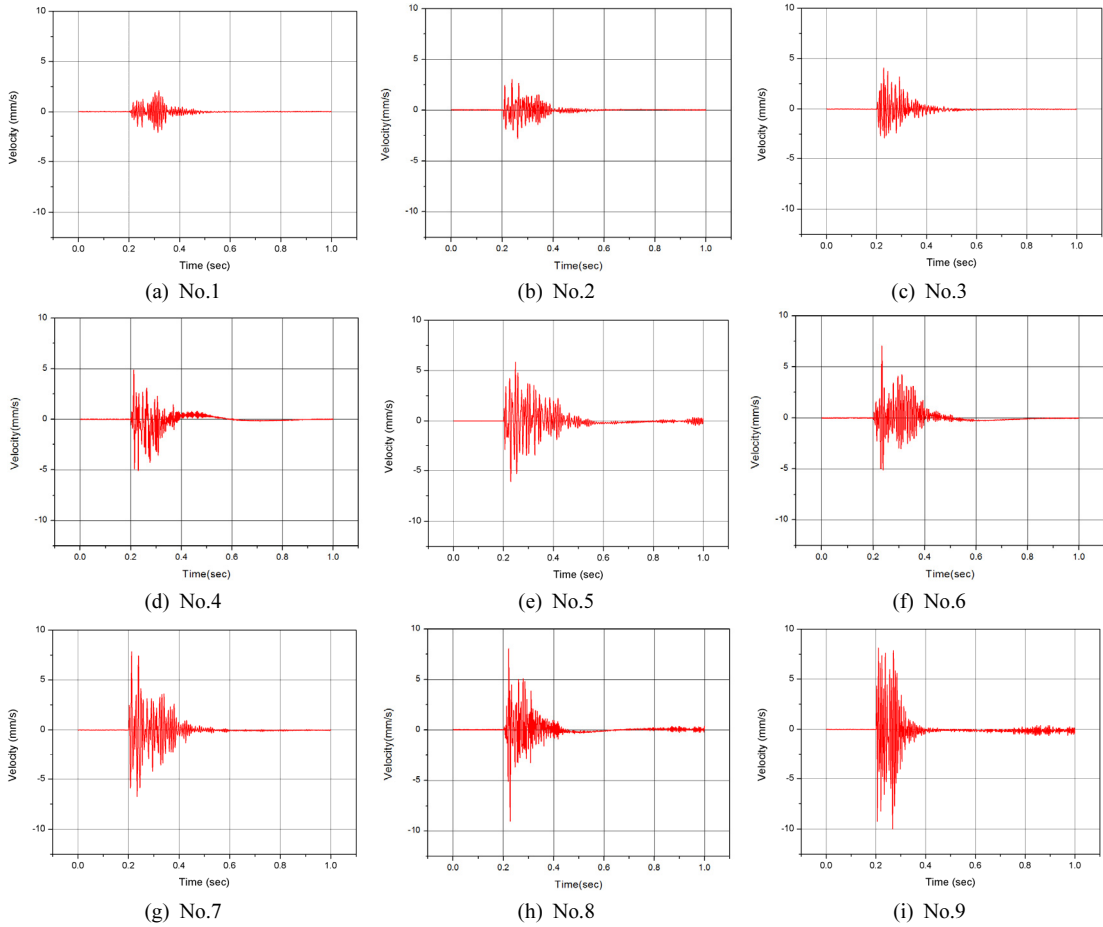


그림 1. 파쇄설비 지하공동 내 계측 발파진동속도 이력곡선.

낙석발생은 환산거리보다는 지반진동속도의 수준과 상관성이 높은 것으로 평가된다.

3. 발파진동에 의한 절리암반 지하공동의 동적 안정성 해석

3.1 해석모델 및 해석조건

파쇄설비 지하공동 형상을 고려하여 그림 3(a)와 같이 해석모델 중심부에 직사각형 내부 경계조건을 주었으며 지하공동의 좌측에서 발파진동이 입사되는 것을 가정하여 좌측 외곽경계에 반원모양의 진동이력 입력경계조건을 설정하였다. 나머지 외곽경계는 발파진동이 반사되지 않도록 비반사경계(연속경계 일종)를 사용하였다. 그림 3(b)는 절리 경사각이 60° 및 70°

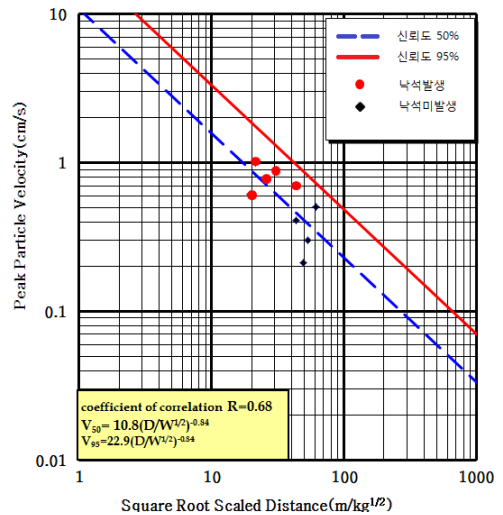


그림 2. 최대입자속도-환산거리와 낙석발생 관계.

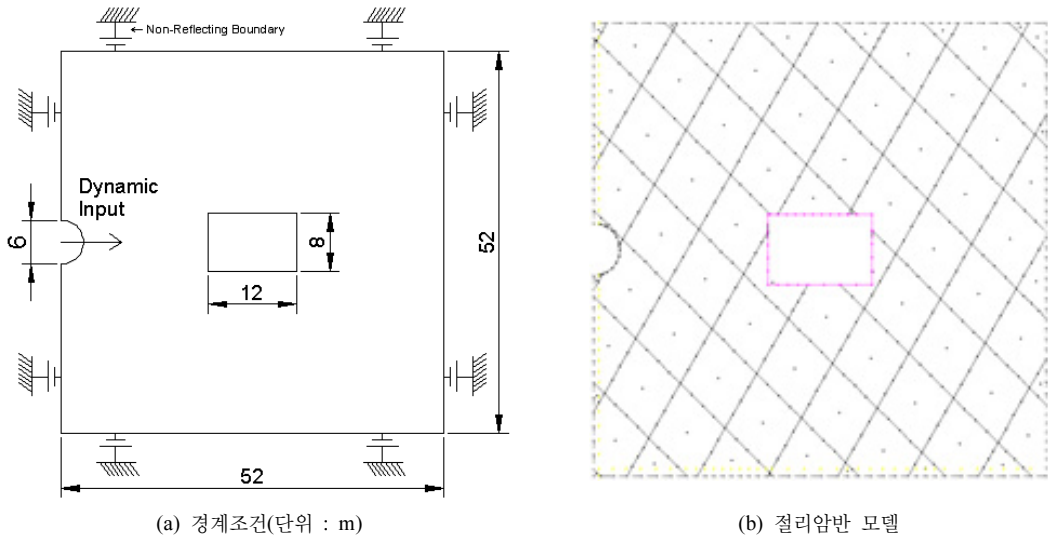


그림 3. 불연속면 압반에 대한 동해석 모델.

표 2. 해석모델 적용물성.

Property	Value
Tensile strength (MPa)	4.12
Density (kg/m^3)	2700
Bulk modulus (GPa)	53
Shear modulus (GPa)	31
Cohesion (MPa)	24
Joint normal stiffness (MPa/m)	10,000
Joint shear stiffness (MPa/m)	10,000
Joint friction angle ($^\circ$)	37
Joint cohesion (MPa)	0.35
Joint tension (MPa)	0.3
Joint space (m)	6
Joint angle ($^\circ$)	60

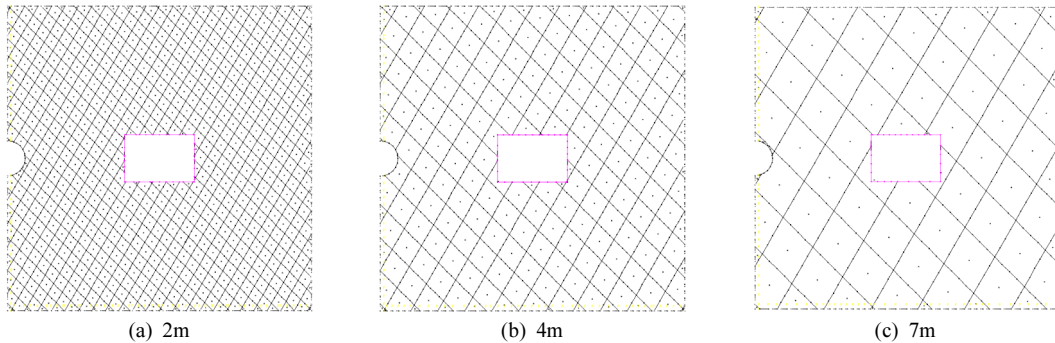


그림 4. 절리 간격의 변화를 고려한 해석모델.

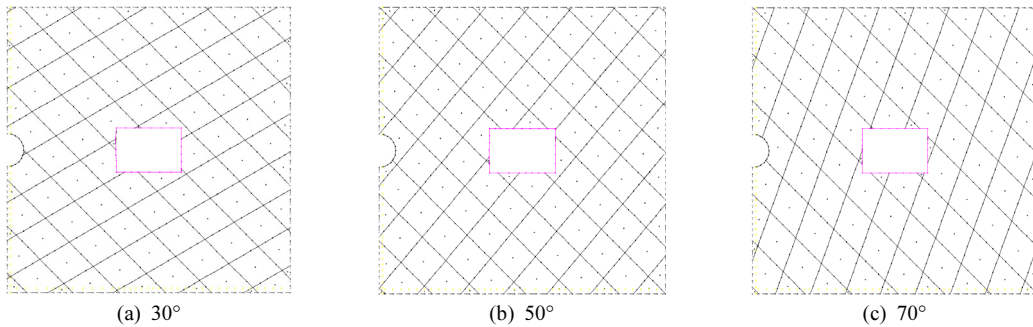


그림 5. 절리 경사각의 변화를 고려한 해석모델.

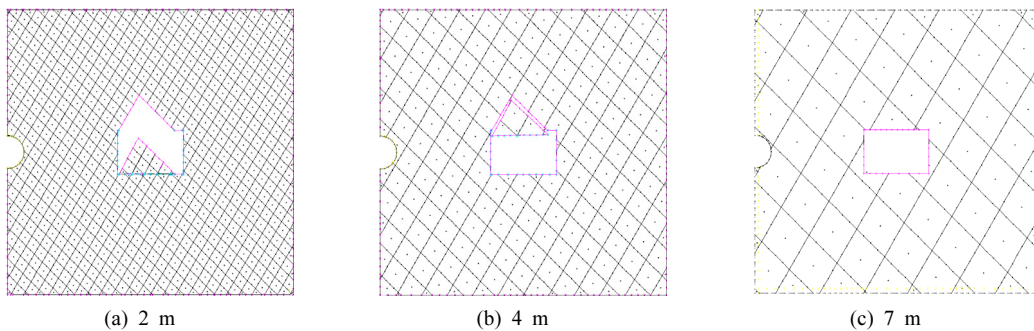


그림 6. 절리간격의 변화에 따른 절리암반 낙석발생 양상.

인 두 절리군이 발달하고 두 절리군의 간격이 6m인 절리암반 모델을 보여주고 있다. 표 2는 해석모델에 적용한 암반물성과 절리의 물성 및 특성을 보여주고 있다.

절리특성의 변화에 따른 낙석발생 한계 발파진동수준을 분석하기 위하여, 표 2에서 보여준 절리 간격, 절리 경사각, 절리 수직강성을 기준으로 절리 간격은 1m부터 8m까지 1m 간격으로, 절리 경사각은 30°부터 80°까지 10°간격으로 변화하는 것을 가정하여 해석모델을 작성하였다. 그림 4는 그림 3(b)에서 보여준 절리암반 해석모델의 절리간격을 2, 4, 7m로 각기 배치시켰을 때 해석모델을 보여주고 있다. 그림 5는 절리간격이 6m이고 절리 경사각이 30°, 50°, 70°인 해석모델을 대표로 나타내고 있다. 인근에서 발생된 발파진동에 의해 여기된 절리암반의 안정성 해석을 수행하기 위하여 개별요소법 기반의 UDEC 소프트웨어를 사용하였다(Cundall and Strack, 1979). 모든 경우의 해석모델에 대하여 그림 1에서 보여준 입자속도 시간이력 곡선을 그림 3(a)의 반원형상의 경계부에 입

력하여 2초간 해석을 수행하였다.

3.2 해석결과

그림 6은 절리 경사각이 60°일 때 절리간격을 달리 한 절리암반 모델에 대한 해석결과를 보여주고 있다. 그림 6(a)는 절리간격이 2m인 해석모델의 천반에서 낙석이 발생한 경우를 보여주는데, 이때 천반에서 측정된 수직방향성분 입자속도는 2cm/s였다. 그림 6(b)는 절리간격이 4m인 해석모델로서 천반의 수직방향성분 입자속도가 6cm/s에서 낙석이 발생하였다. 그림 6(c)는 절리간격이 7m인 해석모델로서 천반의 수직방향성분 입자속도가 6cm/s이었음에도 불구하고 낙석이 발생하지 않은 경우를 보여주고 있다. 그림 7은 절리분포 변화에 따른 낙석발생 한계 입자속도를 나타내고 있다. 살펴보면, 절리 경사각이 증가함에 따라 낙석발생 한계 입자속도는 감소하는 경향을 보이며(그림 7(a)), 절리간격이 좁은 경우는 매우 낮은 입자속도에서 낙석이 발생하며, 3m이상의 절리간격에서는 6cm/s 또는 7cm/s의 비교적 높은 입자속도에서 낙

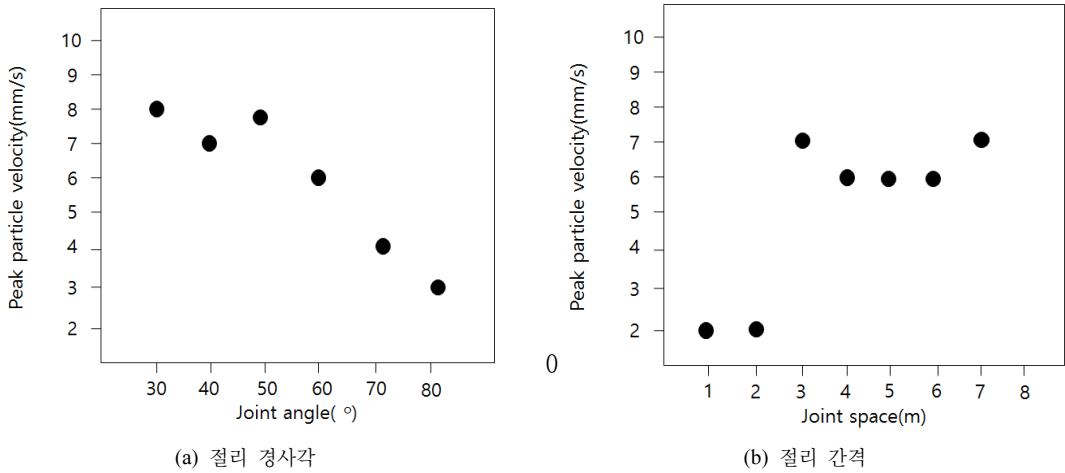


그림 7. 절리특성에 따른 낙석발생 한계 입자속도의 변화.

석이 발생하는 것을 볼 수 있다.

4. 발파손상영역이 절리암반 지하공동의 동적 안정성에 미치는 영향

일반적인 도로터널 발파와는 달리 석회석 지하광산의 채광발파는 최외곽 발파공에 대하여 스무스블라스팅과 같은 정밀발파 공법을 적용하지 않고 천공간격과 장약량을 감소시킨 일반 제어발파 공법이 적용되고 있는 실정으로, 굴착 후 지하공동 주변 암반에 발파손상영역이 존재하게 된다. 이러한 발파손상영역은

변형계수, 수리전도도 및 탄성파속도 등 암반의 물리적, 역학적 특성에 많은 변화를 주면서, 낙반과 같은 갱내사고의 직접적인 원인이 된다고 보고되고 있다. 그림 8은 40cm 깊이의 발파손상영역이 존재하는 절리암반 모델을 가정하여, 절리 경사각이 60°, 절리간격이 6m인 기준모델의 지하공동 주변을 따라 40cm 깊이의 추가적인 절리를 설치하여, 발파진동 여기 동적해석을 수행하였다. 발파손상영역에 대한 물성은 Hoek & Diederichs(2006)의 경험식을 토대로 인장강도 및 탄성계수에 대해 불교란 암반의 60% 수준을 부여하였으며, 단위중량, 포아송비 및 내부마찰각에 대해서는 굴착손상영역 및 불교란영역 간의 값의 차이

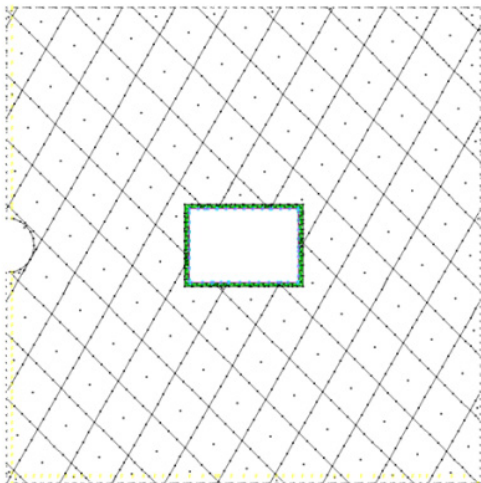


그림 8. 발파손상영역을 적용한 절리암반 해석모델

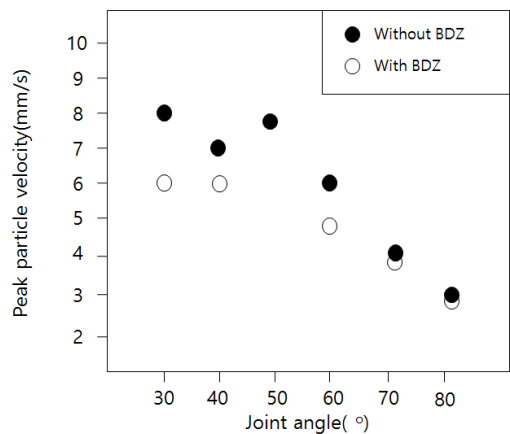


그림 9. 발파손상영역 절리암반모델의 낙석발생 한계 최대 입자속도 비교.

가 뚜렷하지 않다는 연구결과(Chang 외, 2000)를 바탕으로 동일한 값을 적용하였다(권민혁 외, 2016). 그림 9는 발파손상영역을 고려한 절리암반 모델을 손상영역을 고려하지 않은 절리암반 모델(그림 7(a))과 비교하여 낮은 낙석발생 한계 입자속도를 보이며, 이러한 경향은 절리 경사각이 증가하면서 감소하는 경향을 보이고 있다.

5. 결론

석회석광산의 대형지하공동 안정성 확보를 목적으로 채광발파 시 낙석발생 여부 관찰과 발파진동 계측을 수행하였으며, 여기서 측정된 진행방향 입자속도는 UDEC을 이용한 절리암반 동적 안정성 해석의 입사파형으로 사용되었다. 절리의 분포특성이 천반의 낙석발생에 미치는 영향을 분석하기 위하여, 암반모델의 절리 경사각과 절리 간격에 변화를 주었으며, 발파손상영역을 고려한 절리암반 모델을 제안하였다. 본 연구로부터 얻은 결과를 정리하면 다음과 같다. 절리 경사각이 증가함에 따라 낙석발생 한계 입자속도는 감소하는 경향을 보이며, 절리 간격이 좁은 경우는 매우 낮은 입자속도에서 낙석이 발생하고 절리 간격이 넓은 경우에는 낙석 발생 한계 입자속도가 증가하는 경향을 보였다. 발파손상영역을 고려한 절리암반 모델은 낮은 입자속도에서 낙석이 발생할 수 있으며, 절리 경사각이 증가 할수록 발파손상영역의 영향이

감소하는 것으로 나타났다. 추가적으로, 본 논문에서 제시한 낙석발생 한계 입자속도는 가정된 수치해석 입력자료로 도출된 값으로 실제 현장과 다소 차이가 있으므로 정성적인 비교분석에만 사용되어야 한다.

참고문헌

1. 권민혁, 최성용, 김창오, 2016, 굴착손상영역을 고려한 대형 석회석 갱내채광장의 안정성 분석 연구, TUNNEL & UNDERGROUND SPACE, Vol. 26, No. 2, pp. 131-142.
2. Chang, S.H., Shin, I.J., Choi, Y.K. and Lee, C.I., 2000, A study on the Evaluation of Damaged Zone around Tunnel Induced by Blasting, Journal of the Korean Geotechnical Society, Vol. 16, No. 5, 129-140.
3. Cundall, P. and Strack, O., 1979, A discrete numerical model for granular assemblies, Geotechnique, Vol. 29, No. 1, pp. 47-65.
4. Deng, X.F., Zhu, J.B., Chen, S.J., Zhao, Z.Y., Zhou, Y.X. and Zhao, J., 2014, Numerical study on tunnel damage subject to blast-induced shock wave in jointed rock masses, Tunnelling and Underground Space Technology, 43, pp. 88-100.
5. Hoek, E. and Diederichs, M., 2006, Empirical estimation of rock mass modulus, In. J. Rock Mech. Min Sci. 43.2, pp. 203-215.
6. Zhao, H.B., Long, Y., Li, X.H. and Lu, L., 2015, Experimental and Numerical Investigation of the Effect of Blast-induced vibration from Adjacent Tunnel on Existing Tunnel, Tunnel Engineering, KSCE Journal of Civil Engineering, pp. 1-9.



김 현 수

전북대학교 공과대학
자원·에너지공학과 공학박사

Tel: 063-270-4636
E-mail: khs1221@jbnu.ac.kr



김 승 곤

전북대학교 공과대학
자원·에너지공학과 교수

Tel: 063-270-2364
E-mail: kimsk@jbnu.ac.kr



조 상 호

전북대학교 공과대학
자원·에너지공학과 교수

Tel: 063-270-4636
E-mail: chosh@jbnu.ac.kr