

글로리 홀 채광법에서 광체의 낙하메커니즘을 통한 수갱 안전설계 연구

Numerical Study on the Design of Vertical Shaft based on the Falling Mechanism of Ore Particles in Glory Hole Mining Method

최 성 응* 김 재 동**
Choi, Sung-Oong Kim, Jaedong

Abstract

Recently, a large number of open-pit mines are planning to change their mining method to underground types because the environmental concerns and legal regulations are increased with a rise in the standard of living. The K silica mine, which is one of them and located in Kyunggi province, is planning the establishment of a vertical shaft which will be used for ore-pass channel in their new glory hole mining method. This vertical shaft will be designed to join with a horizontal gangway excavated from the ground level. In this new mining system, the excavated ore particles will be stored inside a shaft and transported out with a help of a conveyor belt. Therefore the hang-up of ore particles in a shaft, the control of gate at the bottom of a shaft, the installation of dog-leg at the gate should be investigated identically. In this study, the PFC-2D code which is one of the discrete element numerical methods has been applied to simulate the particle flow mechanism in a shaft, and the optimum mine design has been proposed to maximize the productivity and to minimize the system damage.

키워드 : 노천채광, 갱내채광, ore-pass, PFC-2D

Keywords : open-pit mine, underground mine, ore-pass, PFC-2D

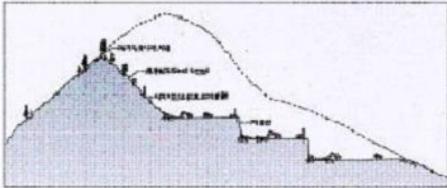
1. 서론

광산의 채광법은 크게 노천 채광방법과 갱내 개발방식으로 구분된다. 채광법 선정은 광산개발에 필요한 여러 요소를 종합 검토하여 수 개의 개발대안을 작성하고 이들의 경제성을 비교 검토하여 최적안을 선정하는데, 일반적으로 노천 채광방식이 갱내개발 방식보다 채광원가 면에서 1/2~1/3 정도로 낮기 때문에 노천 채광방식이 자주 고려된다. 그러나 최근에 와서 생활수준의 향상 등에 따라

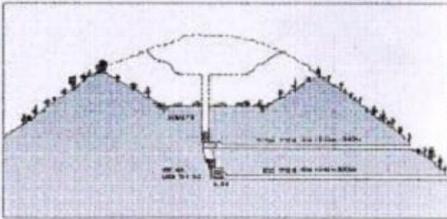
환경에 관한 문제가 사회적으로 많은 관심을 갖게 되면서 노천채광에서 야기될 수 있는 환경오염문제를 근원적으로 해소하고 이와 함께 채산성을 극대화 시킬 수 있는 갱내채광법에 많은 관심이 쏠리고 있다. 이러한 갱내채광법 중의 하나인 Ore-Pass 시스템은 글로리 홀 채광법의 일종으로서 그림 1에서 보는 바와 같이 주 채굴장과 가까운 곳에 수갱을 굴착하여 채굴된 광석을 하부로 자유낙 하하고, 자유낙하된 광석을 갱내에서 1차 파쇄하여 수평갱도를 통한 컨베이어 시스템 등을 통하여 외부로 반출함으로써 환경오염문제를 근원적으로 해결할 수 있으며 동시에 민원발생을 최소화할 수 있는 시스템으로 각광받고 있다. 일반적인 Ore-Pass 시스템의 구성은 그림 2에서와 같이 크러셔에 급광되는 광석의 크기를 조절하고 Ore-Pass 수

* 강원대학교 에너지·자원공학과 교수, 공학박사
** 강원대학교 에너지·자원공학과 교수, 공학박사, 교신저자

갱에서 임시 저장 호퍼로 이송되는 광석의 흐름을 원활하게 하기 위해 입구에 Grizzly Bar와 브레이커 시설을 설치한다. 이때 Grizzly Bar의 간격은 파쇄기에 공급 가능한 광석의 크기로 결정하며, 핑거게이트는 임시 저장 저장조에서 Scalper로 공급되는 광석량을 조절하는 장치이다. 또한, 호퍼의 배출구를 유압손으로 막는 구조로 유압으로 작동되며 원격 조정이 가능한 장치로 설계되어야 한다.



(a) 노천채광법



(b) Ore-Pass 채광법

그림 1 채광법의 비교

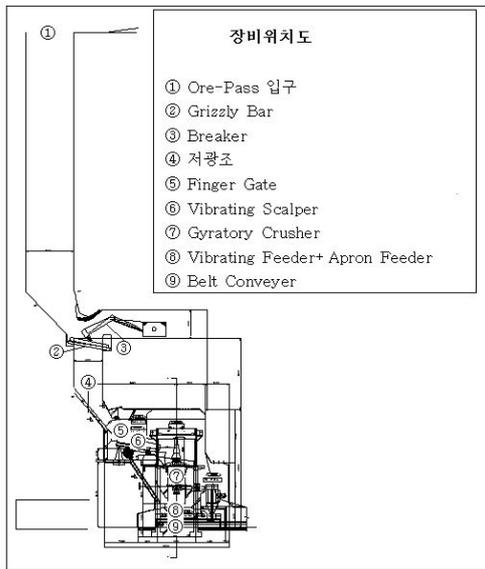


그림 2 Ore-Pass 채광법에서의 장비위치도

따라서 그림 2에서 보는 바와 같이 Ore-Pass 시스템에서의 핵심요소는 광체가 임시로 저장되었다가 하부로 자유낙하하면서 발생하는 하부구조물에서의 충격량 해석, 운반용 벨트콘베이어의 운송능력에 맞는 적절한 투하량의 결정, 그리고 저장소 내에서 발생할 수 있는 파쇄광체들의 영킹현상(hang-up) 해소방안 등이 될 것이다.

이러한 문제점들을 사전에 검토하여 효과적이고 안전한 Ore-pass 시스템 설계를 위하여 본 연구에서는 PFC-2D 프로그램을 이용하여 Ore-Pass 내에서의 광체의 유동을 해석하였으며, 이를 바탕으로 적절한 Ore-Pass 시스템 설계안을 제시코자 한다.

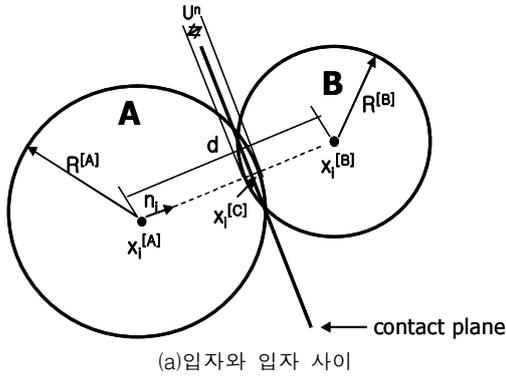
2. PFC-2D의 개요

PFC-2D(Particle Flow Code 2-Dimension)는 개별요소법을 바탕으로 하여 Itasca Consulting Group에서 1995년도에 개발한 상용프로그램이다. 입의 형태를 가지는 입자의 집합체로 모델을 구성하며, 각 입자들은 독립적으로 운동하고 두 입자간의 상호작용은 이들이 접촉점을 통해서만 이루어진다. 입자들이 강성체이고 일정한 강성을 가진다고 가정할 경우, 모델의 역학적 거동은 각각 입자들의 운동과 입자들이 이루는 접촉점에서의 입자간의 힘을 이용하여 설명할 수 있다.

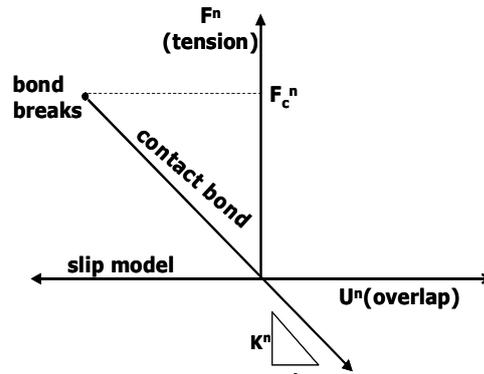
그러나 입자 간에 결합력이 작용한다면 좀 더 복잡한 거동을 모사할 수 있는데, 이 경우 입자 간에 작용하는 힘이 결합력을 초과할 경우 입자의 결합은 깨어지게 된다. 이를 이용하여 결합력을 가진 입자들로 이루어진 집합체에 발생하는 균열을 모사할 수 있다. 즉, 운동방정식을 통하여 각 입자들에 가해지는 힘과 모멘트를 계산한 후 이를 다시 응력-변형률 관계식을 통해 유도응력 및 변위를 계산한 뒤, 다시 운동방정식을 적용하는 체계이다.

따라서 본 연구에서 사용된 PFC-2D는, 모든 입자들은 강성체인 원형으로 만들어지고, 각 입자간의 접촉형태는 극히 작은 면적, 즉 점으로 간주하며, 강성입자들은 접촉점에서 중첩이 허용되고, 중첩량은 힘-변위 법칙에 의해 언어지는 접촉력과 관계 있다는 가정을 포함하고 있다.

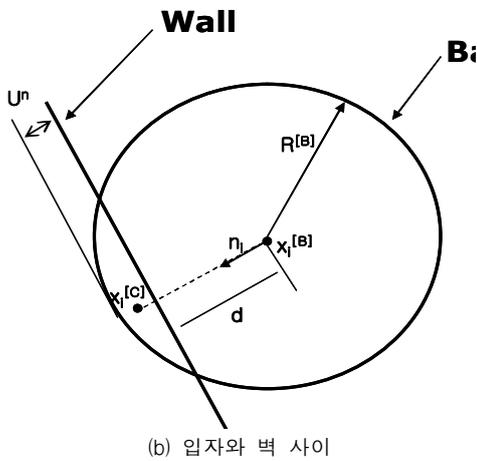
그림 3은 PFC-2D에서 정의하는 입자와 입자 사이의 접촉 및 입자와 벽 사이의 접촉관계를 설명하는 모식도이다. 이러한 가정을 바탕으로 입자와 입자, 또는 입자와 벽 사이의 접촉력에 대한 수직 성분과 전단성분을 규명하여 해석모델의 변형 및 파괴거동을 판단하게 되는데, 그림 4에서는 이에 대한 개념을 나타내고 있다.



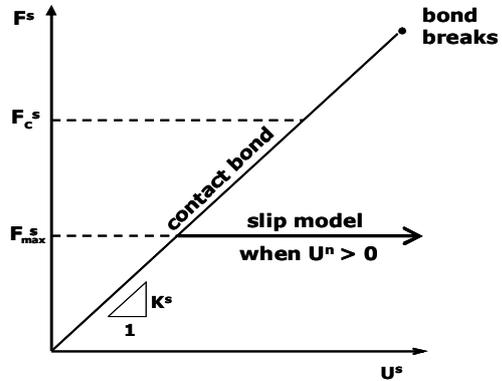
(a) 입자와 입자 사이



(a) 수직 성분



(b) 입자와 벽 사이



(b) 전단 성분

그림 3 PFC-2D에서의 정의

그림 4 PFC-2D에서의 접촉력에 관한 정의

3. 광체 유동 해석

3.1 유출량에 따른 광석의 유동 경로

Ore-Pass에서의 유출량에 따른 광체의 유동현상을 분석하기 위하여 단일 광석의 자유낙하 현상에 대한 수치해석을 수행하였다. 광석의 크기는 광산에서 제공한 입도 분포 크기인 150~250mm를 기준으로 입의 크기로 생성하였으며, 해석에 사용된 Ore-Pass의 크기는 직경 3m, 길이 180m이고 광체의 낙하지점인 기계실은 Ore-Pass의 바닥부에 위치하며 9.4x9.4m 로 고려하였다.

그림 5는 향후 시공될 Ore-Pass 시스템의 개념도를 나타내고 있는데, 이를 토대로 수치해석 모델에서는 가로 23m, 세로 199.4m로 해석영역을 설정하였다. 그림 6은 직경 250mm의 광석을 1초 간격으로 자유낙하 시켰을 때를 나타내고 있으며 이때의 가속도 분포는 표 1과 같다.

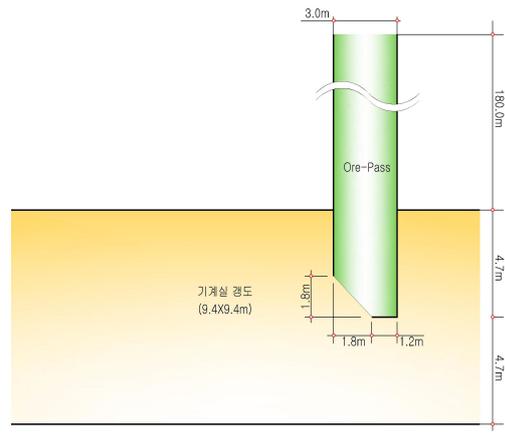


그림 5 Ore-Pass 시스템의 개념도

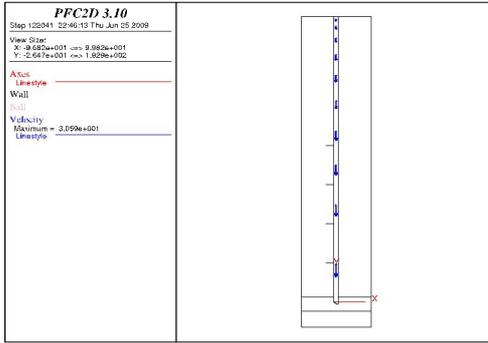


그림 6 Ore-Pass 내에서의 광석의 자유낙하 (1초 간격으로 투하 시)

표 1 PFC-2D 해석에서의 광석의 속도와 가속도

시간 (sec)	통과지점 (m)	속도 (m/sec)	가속도 (m/sec ²)
1	1.50	2.95	-
2	6.00	5.90	2.95
3	13.20	8.84	2.94
4	23.58	11.79	2.95
5	36.95	14.78	2.99
6	53.04	17.68	2.90
7	72.21	20.63	2.95
8	94.28	23.57	2.94
9	119.34	26.52	2.95
10	147.35	29.47	2.95
10.3	156.30	30.35	2.93

표 1에서 보는 바와 같이, PFC-2D 해석에 따른 가속도 분포는 실제 중력가속도의 약 1/3에 해당하는 값을 보이고 있는데, 이는 물체의 자유낙하 시에는 물체의 중량이 고려되지 않지만 PFC-2D에서는 중력가속도가 매질의 중량과 물체력을 조합한 가속도로 환산되기 때문이다.

따라서 이러한 개념을 기준으로, 광석을 자유낙하시켜 Ore-Pass내의 벽면의 손상여부와 진행경로, 그리고 바닥부에서의 충격량 등을 분석하였다.

광석들의 자유낙하 경로를 분석하기 위하여 대상 광산의 상부 1차 크러셔의 처리용량(500ton/hr)을 고려하여 광석 투하량을 140kg/sec로 설정하였으며, 그림 6에서와 같이 1초 간격으로 140kg의 광석을 자유낙하 시켜 분석하였다. 그 결과, 그림 6에서와 같이 일정한 간격으로 배출이 일어나지만 각각의 그룹들 간의 이동거리의 차이가 나는 것을 확인할 수가 있다. 이러한 이유는 중력방향으로의 가속도가 부여되어 점차적으로 속도가 증가함에 따른 것으로 판단된다.

3.2 채움조건별 광석의 배출양상 분석

Ore-Pass 바닥면을 기준으로 각각 25, 50, 75m 높이로 광석을 채운 뒤, 하부 Gate를 개방할 경우의 광석의 배출양상을 분석하였다. 이때 광석의 채움조건을 PFC-2D에서 구현하기 위하여 입자 사이의 공극률을 0.14로 부여하였으며, 또한 중력조건을 이용하여 다짐효과를 부여하였다. 만약 수치해석상에서 이러한 다짐효과를 부여하지 않을 경우 실제의 경우보다 훨씬 많은 광석이 순간적으로 배출될 수 있기 때문이다.

해석결과, 25m 채움조건에서 10초 동안 자연 배출을 시키면 최종 채움높이는 약 3m 정도 감소하는 것으로 나타났다. 이러한 채움높이의 감소량은 수직갱의 직경을 고려할 때 약 57ton/10sec의 광석 배출량이 됨을 의미한다. 이는 하부 갱도의 컨베이어 운송용량인 500ton/hr(1.3ton/10sec)의 약 43배로서, Gate를 이용한 배출량의 인위적 조절이 반드시 필요하다는 것을 의미하는 결과이다.

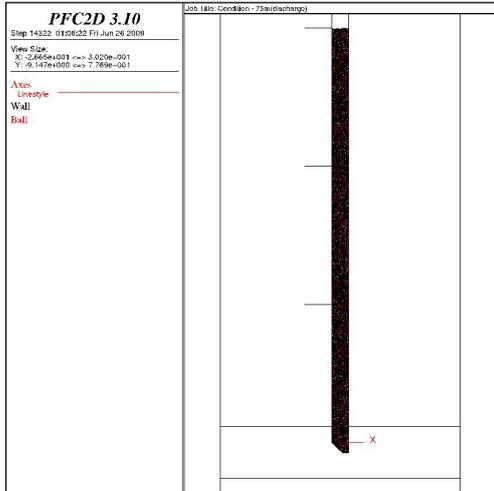
마찬가지로 50m 채움조건에서 10초 동안 광석을 자연배출 시켰을 경우 채움높이는 최종적으로 3.26m 만큼 감소하였으며 이를 광석배출량으로 환산하면 62ton/10sec이다. 따라서 50m 채움조건에서도 컨베이어 운송용량을 초과하는 배출량이 확인되었다.

75m 채움조건에서 동일한 해석을 수행한 결과, 채움높이는 2.23m 만큼 감소하였는데, 이를 광석배출량으로 환산하면 42ton/10sec이다. 이는 25m 및 50m 채움조건에 비하여 가장 낮은 광석배출량인데 그 이유로서 채움높이가 커짐에 따라 광석의 다짐현상이 커지며 이는 광산에서의 hang-up 현상과 직결된다. 따라서 하부 Gate가 개방되지 않은 상태에서의 채움높이는 가급적 75m를 넘지 않는 것이 바람직할 것으로 판단된다.

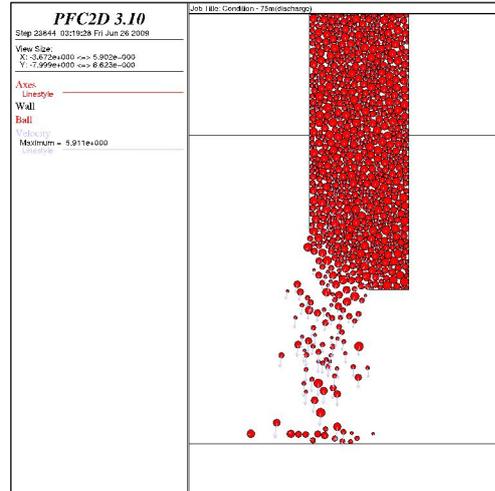
그림 7은 채움조건별 광석의 배출양상에 관한 해석의 한 예로서 75m 채움조건에서의 시간대별 광석배출양상을 나타내고 있다.

3.3 바닥부에서의 충격량 산정 및 안정성 평가

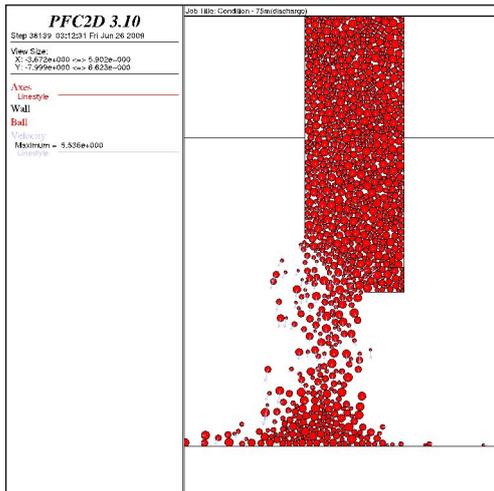
Ore-Pass 바닥면과 Gate면에서의 충격량 평가. 광석이 자유낙하하여 Ore-Pass 바닥부에서 충돌이 일어날 경우, 바닥면에 광석이 채워지지 않은 초기단계에서는 광석의 도약(Bounding)이 크게 일어나며 또한 충격량도 크게 발생한다. 하지만 점차적으로 바닥면에 광석이 쌓이면서 도약도 작게 일어나고 충격량도 초기에 비하여 감소함을 알 수 있다. 즉, Ore-Pass 바닥면에서의 최대 충격량은 $3.638 \times 10^4 \text{N}$ 이고, Gate면에서는 $1.863 \times 10^5 \text{N}$ 으로 측정되었다.



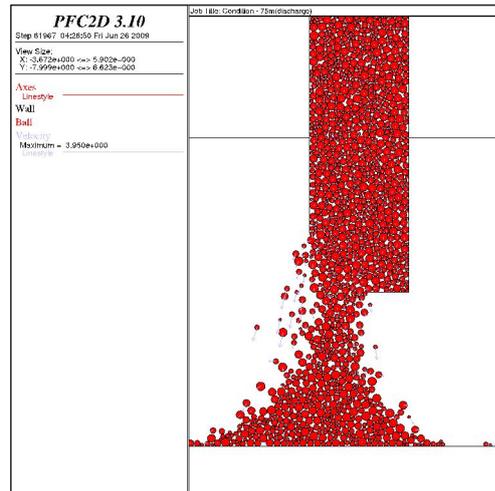
(a) 초기 상태



(b) 2초 후



(c) 5초 후



(d) 10초 후

그림 7 시간에 따른 광석의 자연배출 양상 (채움조건=75m)

이러한 결과는 Ore-Pass 가동시에 Ore-Pass 하부 바닥면에서의 충격하중을 고려하지 않을 경우 하부 구조물에 큰 손상을 가져올 수 있을 것이라 판단된다.

나. Dog-Leg 설치시 운반경도 바닥면에서의 충격량

광석의 자유낙하로 인하여 운반경도 바닥면에 직접 가해지는 충격량을 감소시키기 위하여 Ore-Pass 하단에 Dog-leg를 설치하는 것을 고려

하였으며, 이때 설치각은 각각 30°, 40°, 45°로 고려하여 해석을 수행하였다. 해석결과 운반경도 바닥면에서의 충격량은 각각 $4.016 \times 10^4 \text{N}$, $3.361 \times 10^4 \text{N}$, $3.390 \times 10^4 \text{N}$ 였으며, Dog-leg를 설치하지 않은 경우에 비해 충격량이 감소함을 확인할 수 있었다. 따라서 Ore-Pass 시스템에서의 하부 구조물의 안정성을 확보하기 위해서는 반드시 Dog-leg의 설치가 고려되어야 하며 이때 그 각도는 40° 내지 45°가 바람직할 것으로 판단된다. 그림 8은 45°의 Dog-leg를 설치했을 경우의 예이다.

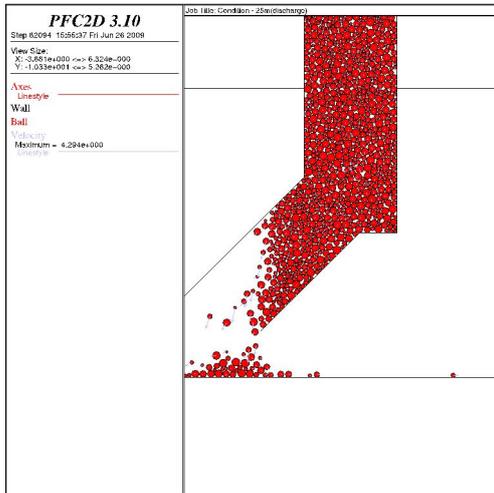


그림 8 Dog-leg 설치시 광석의 배출양상

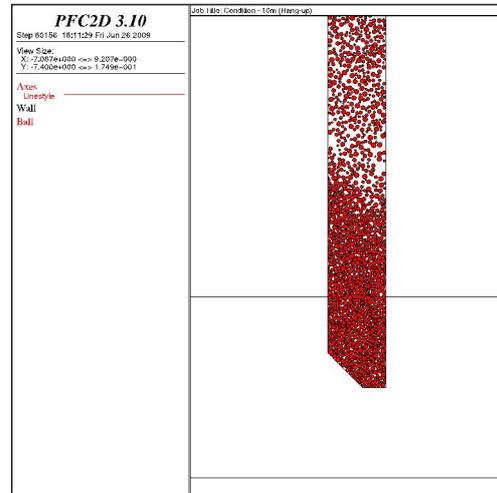


그림 9 hang-up 발생 및 해소에 따른 광석의 자연배출 양상

다. Hang-up 처리시 Ore-Pass 바닥면에서의 충격량

50m 채움높이 상태에서 하부 Gate를 개방하였을 경우 하부로부터 각각 10m, 15m, 20m, 30m 지점에서 hang-up이 발생하였을 경우를 가정하였다. hang-up 해소를 위해 발파 등의 충격하중을 가할 경우 광석더미가 순간적으로 Ore-Pass 하부로 떨어지게 되는데, 이때 10초 동안의 충격하중을 분석하였다(그림 9).

그 결과, hang-up 높이에 따라 최대충격량은 각각 $5.753 \times 10^4 \text{N}$, $9.924 \times 10^4 \text{N}$, $7.129 \times 10^4 \text{N}$ 및 $1.585 \times 10^5 \text{N}$ 로 나타났는데, 그림 10에서 보는 바와 같이 20m의 경우를 제외하고 대체적으로 hang-up 높이에 따라 충격량도 증가하는 양상을 확인할 수 있다. 따라서 hang-up 해소에 따른 버력 처리시 구조물의 손상을 미연에 방지할 수 있는 완충시설이 필요할 것으로 판단된다.

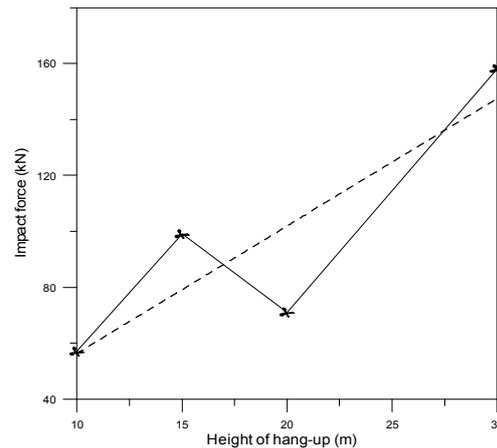


그림 10 hang-up 발생 높이에 따른 충격량

4. 결과 분석

본 연구에서는 PFC-2D에 의하여 Ore-Pass내 광석의 유동과 이에 따라 발생할 수 있는 충격하중에 대하여 수치해석을 실시하였다. 해석조건으로는 직경 3.0m, 높이 180m의 수직갱을 고려하고 광산에서 제공된 1차 크리셔의 입도분포에 의하여 광석을 임의로 생성하였다. 또한 광산의 투하량은 초당 140kg으로 설정하였다. 이에 따른 수치해석 결과를 요약하면 다음과 같다.

(1) 140kg의 광석 그룹을 Ore-Pass 상부의 중심부

를 기준으로 수평 양방향 50cm 범위 내에서 자유낙하시킨 결과, 벽면으로부터의 이격거리로 인하여 낙하 과정에서 Ore-Pass 벽면에서의 손상대는 발생하지 않았다.

(2) 140kg의 광석 그룹들의 낙하로 인해 Ore-Pass 바닥면에 작용하는 충격하중은 Ore-Pass하부에서 $3.638 \times 10^4 \text{N}$, Gate에서는 $1.863 \times 10^5 \text{N}$ 으로 측정되었다. 이러한 결과는 실제 Ore-Pass 가동시 충격하중을 고려하지 않을 경우 구조물의 손상을 초래할 수 있을 것으로 판단되는 충격량이다. 따라서 Ore-Pass 설계시 이러한 충격하중을 고려하여 충분한 내력을 가질 수 있는 설계가 수반되어야 할 것이다.

(3) Ore-Pass 바닥면을 기점으로 광석을 채워 25m, 50m, 75m로 채움조건을 부여하여 광석의 자연배출양상을 분석한 결과, 광석의 채움높이는 2.23~3.26m 정도 감소하는 것으로 밝혀졌다. 이러한 채움높이의 감소량은 42~62ton/10sec 정도의 배출량으로서, 컨베이어 벨트의 운송용량인 1.3ton/10sec에 비하여 상당히 많은 배출량이다. 따라서 Ore-Pass 가동 시에는 반드시 Ore-Pass 하부에 Gate를 마련하여 배출량을 인위적으로 조절할 수 있는 시스템이 마련되어야 할 것으로 판단된다.

(4) 75m 채움조건에서는 25m 및 50m 채움조건과는 달리 배출량이 가장 낮게 측정되었고, 이러한 원인은 광석의 팽창률 증가와 광석 간의 접촉력 증대에서 비롯된 것으로 판단된다. 또한 75m 이상의 채움높이일 경우에는 hang-up 현상이 발생할 가능성이 높다는 것을 의미한다.

(5) Dog-Leg 설치 유무에 따른 광석의 자연 배출 양상으로 인한 운반경도 바닥부의 충격량을 분석한 결과 Dog-Leg를 설치하는 것이 충격량을 경감하는데 효과가 있는 것으로 분석되었다. 또한 Dog-Leg 경사를 35°, 40° 및 45°로 달리 하였을 경우 40° 및 45°에서 충격량의 경감효과가 크게 나타나는 것으로 분석되었다. 따라서 광석의 자연배출에 따른 운반경도 바닥부의 충격량을 감소시키기 위해서는 반드시 Dog-Leg의 설치가 필요하며 이때 그 각도는 최소 40° 이상으로 설계하는 것이 구조물의 안정성을 확보하는데 바람직할 것으로 판단된다.

(6) hang-up 높이에 따른 Ore-Pass 바닥부의 충격하중을 분석한 결과, hang-up의 높이가 증가함에 따라 충격하중은 비선형적으로 증가하는 것을 알 수 있었다. 따라서 hang-up 발생가능성을 낮추기 위해, 또한 hang-up 해소 시 바닥면에서의 충격량을 최소화하기 위해서는 채움높이를 높지 않게 유지하는 것이 대단히 중요한 요소임을 알 수 있었다.

사 사

본 연구는 한국광물자원공사의 연구비 지원으로 수행되었음.

참 고 문 헌

- [1] 최성웅, “균열전파 양상에 관한 수치해석적 비교분석 연구”, *한국지구시스템공학회지*, Vol.46, No.6, pp.1-9, 2009.
- [2] Bieniawski, Z.T., *Rock Mass Classification in Rock Engineering, Exploration for Rock Engineering*, Balkema, pp.97-106, 1976.

[3] Itasca Consulting Group, PFC(Particl Flow Code), User's Manual, Ver.3.1, 2004.

[4] KORES, *Evaluation of Stability of Ore-Pass*, 208p, 2009.