

장공발파 시 천공간격과 기폭시차에 따른 최대주변형률 비교 연구

송정언^{1)*}, 박 훈²⁾, 김승곤³⁾

Comparative Study on the Maximum Principal Strain due to the Hole Spacing and the Detonation Delay Time in the Long-Hole Blasting

Jeong-Un Song, Hoon Park, Seung-Kon Kim

Abstract In this study, the effect of the hole spacing and the detonation delay time in the long hole blasting of two free surface rock mass on the variation of the principal strains in the vicinity of blasting holes is investigated by use of the finite element program, Visual FEA. The cross section perpendicular to blasting holes is modelled and the maximum principal strains at some major points in the cracking zone are examined. As a result, it was found that the maximum principal strain in the cracking zone becomes larger in the long hole blasting with the narrower hole spacing and the longer detonation delay time. The maximum principal strain was affected by the detonation position in charge hole.

Key words Maximum principal strain, Finite element, Long hole blasting

초 록 본 연구에서는 2자유면을 가진 암반의 장공발파 시 천공간격과 뇌관의 기폭시차에 따라 발생하는 내부 주변형률의 변화를 확인하기 위하여 Visual FEA 유한요소 프로그램으로 해석 암반의 단면을 모델링하여 인접공 균열권 내의 주요 절점에서 최대주변형률을 분석하였다. 결과적으로, 장공발파 시 천공간격이 좁고 기폭시차가 길수록 인접공 균열권 내에 미치는 최대주변형률 값이 크게 나타났고, 장약장 내 폭약의 기폭 위치에 따라 최대 주변형률의 차이를 보였다.

핵심어 최대주변형률, 유한요소, 장공발파

1. 서 론

사토 및 골재, 규격석 등 암석 채취를 목적으로 하는 대규모 채석장에서는 도심지 내에서의 발파공사와는 다르게 장공발파에 의해 암반을 절취해 나간다. 하지만, 이러한 대규모 장공발파는 약간의 천공 오차 및 뇌관의 기폭시차, 기폭약의 위치(정기폭, 중기폭, 역

기폭) 등에 따라 장약공 내 폭약의 불발 및 잔류약을 남길 우려가 있다. 소위 말하는 폭약의 사압 현상이라든지 암반 내 응력장의 이동에 따른 인접공 내에서의 Cut-off 등이 폭약의 불발 및 암반 내 잔류에 영향을 미치는 주요 매개인자라고 할 수 있다(민형동 외, 2008). 이러한 영향 변수들은 폭약의 폭속과 연관이 있으며, 이승찬(2005) 및 조영곤 외(2002)도 폭약의 폭속에 따른 변형성 및 영향성을 연구해 왔다. 또한, 발파에 의한 암반의 이동 및 응력장에 따른 균열 원리 등(윤지선 외, 2009; 이기근 외, 2012)의 연구도 진행되어 왔으며, 천공패턴 및 기폭시차에 따른 암반 파쇄 입도(이춘우 외, 2000)에 관한 연구가 있었지만 일반적으로 이론적인 근거나 경험을 바탕으로 예측될 뿐 암반

¹⁾ 전북대학교 자원·에너지공학과 시간강사

²⁾ 전북대학교 자원·에너지공학과 겸임교수

³⁾ 전북대학교 자원·에너지공학과 교수

* 교신저자 : sjuda@jbnu.ac.kr

접수일 : 2014년 11월 30일

심사 완료일 : 2014년 12월 16일

계재 승인일 : 2014년 12월 24일

내에서의 변형 메커니즘을 규명해 내기에는 무리가 따랐다. 따라서, 본 연구에서는 폭약이 기폭되었을 때 암반 내에서의 변형 영향권을 확인하기 위하여 15m 천공장으로 이루어진 암반을 유한요소 프로그램으로 모델링하였다. 모델링된 해석 영역에서 장공발파 시 전열공이 발파되었을 때 발생하는 응력장에 의한 주변형률을 이용하여 인접공 내에서의 최대주변형률을 분석하였다. 또한, 인접공 내에서의 최대주변형률 영향권은 전열공과 인접공 간의 천공간격과 장약장 내 폭약의 기폭시차에 따라 비교하였다.

2. 해석 방법

본 연구에 이용된 유한요소해석 프로그램은 암반, 지반 및 구조 모형의 2차원 및 3차원 해석을 구현할 수 있는 Visual FEA 상용프로그램으로서, 프로그램

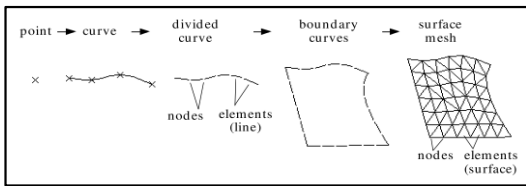


Fig. 1. The creative processing of the finite element by mesh generation.

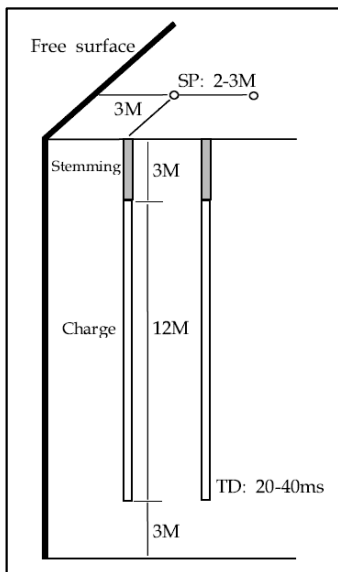


Fig. 2. Description of the finite element model.

의 해석 과정은 Fig. 1에서 보여주는 것과 같이, Mesh generation을 통해 해석 모형의 요소를 형성시키고, 형성된 요소 내에서의 암반 물성 값 및 경계 변수, 동적 하중 값들을 지정하여 Assign한 후, 선형 동적 해석 단계를 거쳐 해석 질점에서의 방정식 해를 산출하게 된다.

2.1 해석 모형

유한요소해석 모형은 Fig. 2와 같으며, 2자유면 상의 최소저항선은 3m, 천공장은 15m, 장약장은 12m, 전색장은 3m로 설정하여 해석 모형을 2D 평면 모형으로 유한요소 모델링을 하였다. 또한, 유한요소해석 변수로서 전열공과 인접공 간의 천공간격은 2m와 3m로 하였고, 뇌관의 기폭시차는 전열공은 0ms, 인접공은 20ms와 40ms로 설정하여 유한요소해석을 수행하였다.

2.2 해석 조건

유한요소해석 모형의 물성 값은 Table 1과 같으며, 암반의 단위중량 및 탄성계수, 포아송비는 토양 및 풍

Table 1. Physical properties of the rock mass

Classification	Unit weight (KN/m ³)	Elastic modulus (KN/m ²)	Poisson's ratio
Weathered rock	17	2.6×10 ⁵	0.37

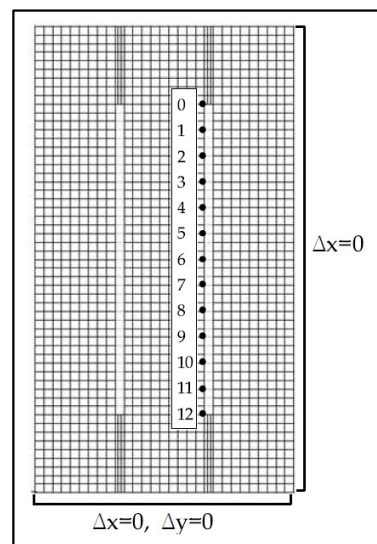


Fig. 3. The boundary condition and the analysis node.

화암층의 물성 값을 설정하였다(Zaman et al., 1984). 해석 모형의 경계 조건은 반무한 등방체 상태의 압반 조건으로 설정하였으며(유희룡, 2007), 하부 경계 조건은 $\Delta x = \Delta y = 0$ 상태, 측벽 경계 조건은 $\Delta x = 0$, $\Delta y = \text{free}$ 상태를 유지하였다. 해석 모형의 절점들은 사각형 mesh를 이용하여 구현되었고, 3개의 사각형 mesh를 1m 단위의 해석 절점으로 지정하여 유한요소 해석을 수행하였다. 또한, 전열공이 폭발된 후 암반의 변형에 의한 인접공의 상태를 확인하기 위해 인접공의 장약장을 1m 단위의 절점으로 지정하여 그 절점에서의 최대변형률을 확인할 수 있도록 하였다. Fig. 3은 해석 모형의 경계 조건과 해석 절점을 보여주고 있다. 장약장의 폭발 하중은 전열공 및 인접공 내 장약장의 각 절점들에서 선형 동적 하중을 균등 분포 하중 상태로 입력하여 시간 증분에 따른 하중 변화를 볼 수 있도록 하였는데, 해석 모형에서 각 절점에 입력된 폭발 하중은 각각의 공내에서 작용되는 압력으로서 $1,000 \text{ KN/m}^2$ 의 폭발 압력 값을 시간 해석 영역에 따라 입력하였다. 시간 영역에서의 방정식의 해는 일반적으로 직접 적분법이 이용되며, 가장 보편적인 방법

인 Newmark법(Newmark, 1959)으로 선형 동적 해석을 수행하였다. 동적 하중의 시간 증분은 0.0005초(0.5ms)로 하였으며, 0.001초(1ms)까지 최대 하중을 유지하고, 0.003초(3ms)까지 시간 증분에 따른 하중이 가해지도록 지정하였다. 일반적으로, 공내에 작용하는 압력은 0초에서 0.0005초(0.5ms)까지 증가하다가 0.002초(2ms) 이내에 대부분 소멸되는데, 본 연구에서는 선형 하중으로 동적 해석을 수행하기 위한 조건으로 0초에서 0.001초(1ms)까지의 하중을 균등하게 유지하였다. 여기서, 동적 해석 시간은 0.05초(50ms)였다. Fig. 4는 해석 모형에 지정된 선형 동적 하중을 나타내고 있다.

3. 결과 및 고찰

3.1 해석 변수에 따른 최대주변형을 비교

Fig. 5에서 Fig. 9는 해석 변수에 따른 인접공의 각 해석 절점에 작용하는 최대주변형률을 나타내고 있다. 전열공이 발파되었을 때 인접공에서의 최대주변형률 해석은 지정된 절점에서 얻을 수 있었는데, 전색장으로부터 장약장의 깊이를 기준으로 0m, 3m, 6m, 9m, 12m 해석 절점에서 시간 증분에 따른 최대주변형률을 해석 변수에 따라 비교하였다. 모든 해석 절점에서 전열공과 인접공의 천공간격이 3m일 때보다 2m로 좁아졌을 때 최대주변형률 값이 크게 나타났으며, 뇌관의 기폭시차에 따라 인접공이 20ms에서 기폭되었을 때와 40ms에서 기폭되었을 때의 최대주변형률 값 또한 시간 증분에 따라 변화를 보였다. 천공간격이 3m로 동일한 상태에서 기폭시차에 따른 최대주변형률은 장약장의 위치에 따라 다른 값을 나타냈으며, 기폭시차가 40ms로 길어질 때 최대주변형률 값이 대부

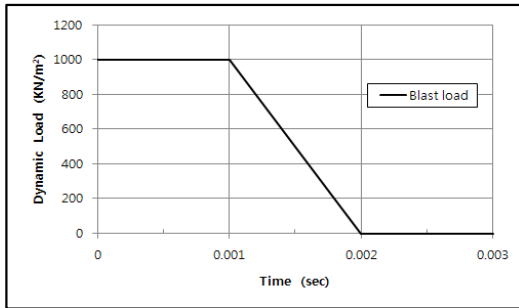


Fig. 4. The dynamic load by the time increasing.

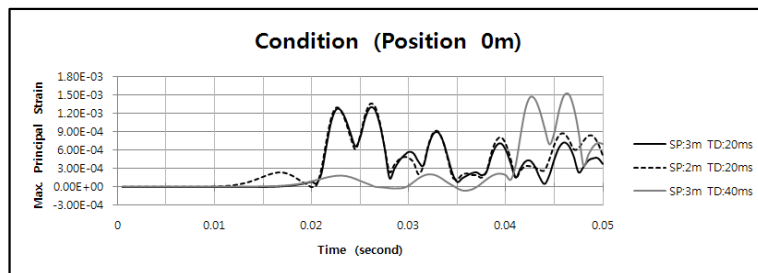


Fig. 5. Comparison of the maximum principal strain by the condition (position 0m).

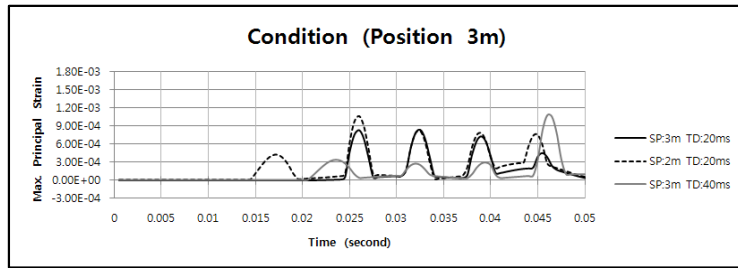


Fig. 6. Comparison of the maximum principal strain by the condition (position 3m).

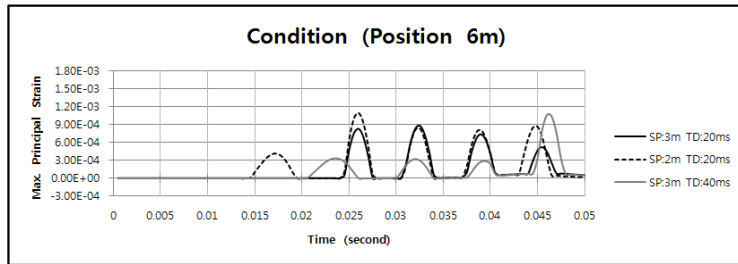


Fig. 7. Comparison of the maximum principal strain by the condition (position 6m).

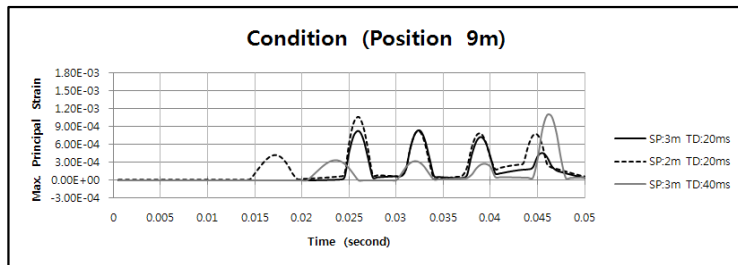


Fig. 8. Comparison of the maximum principal strain by the condition (position 9m).

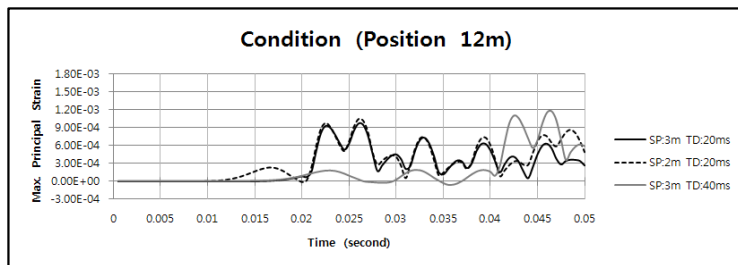


Fig. 9. Comparison of the maximum principal strain by the condition (position 12m).

분 더욱 큰 값을 보이는 것으로 확인되었다. 이는 전열공의 기폭으로 발생되는 암반 내 응력장은 인접공에 영향을 줄 수 있으며, 천공간격 및 기폭시차에 따라 인접공 내에서의 변형 정도가 달라질 수 있음을 의미한다. Fig. 10과 Fig. 11은 해석 변수에 따른 전열공과

인접공에서의 최대주변형률 양상을 보여 주고 있다.

3.2 해석 절점에서의 최대주변형률 비교

전열공이 발파된 후 인접공이 발파되기 이전의 해석 시간인 19.5ms와 39.5ms에서의 최대주변형률을

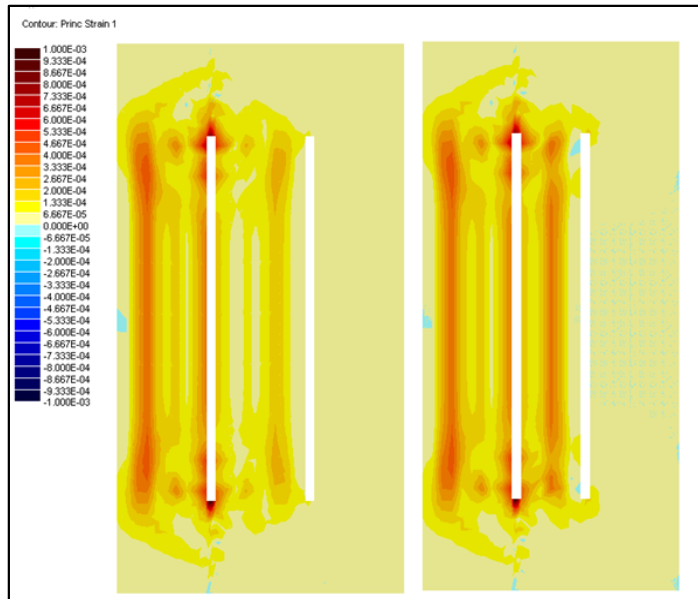


Fig. 10. Description of the maximum principal strain on analysis node (Relation between SP:3M and SP:2M).

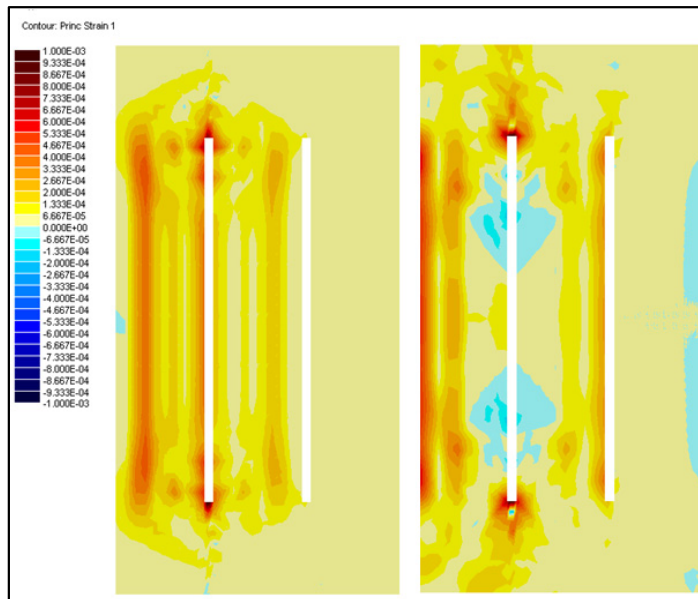


Fig. 11. Description of the maximum principal strain on analysis node (Relation between TD:20ms and TD:40ms).

비교하였다. Fig. 12에서 Fig. 14는 유한요소 모형의 해석 절점에서 각각의 해석 조건에 따라 얻어진 최대 주변형을 값을 나타낸 것이다. Fig. 12에서 보여주는 것과 같이, 천공간격이 3m이고, 기폭시차가 20ms인 조건 하에서 얻어진 해석 절점의 최대주변형을 값을

비교해 보면, 장약장의 깊이에 따라 다른 값을 보이는 것으로 나타났다. 장약장의 시점부와 종점부에서 큰 값을 나타냈고, 중심부로 갈수록 작은 값을 나타냈다. 최대주변형을 값이 가장 큰 부분은 장약장 종점부인 12m 지점으로서 $6.9E-05$ 값을 나타냈고, 가장 작은

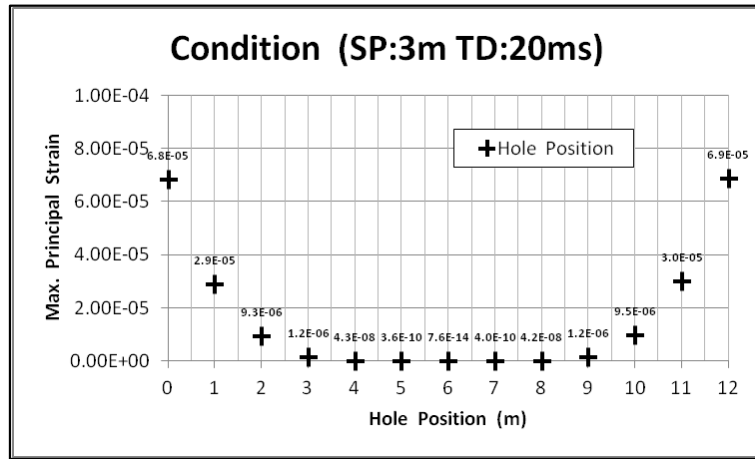


Fig. 12. Comparison of the maximum principal strain at the hole position (SP:3M TD:20ms).

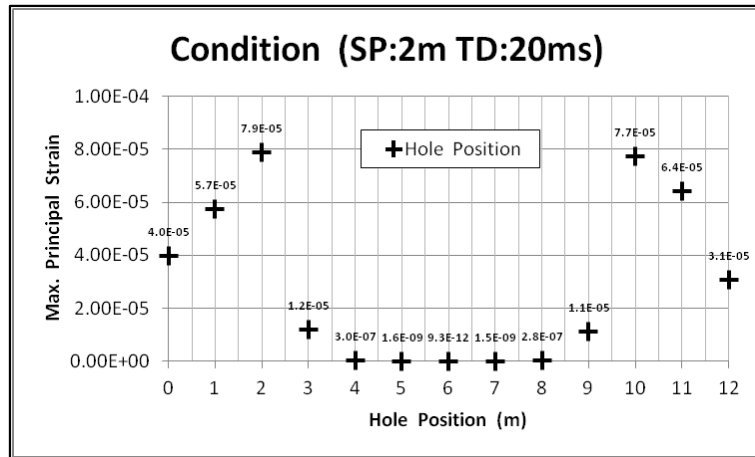


Fig. 13. Comparison of the maximum principal strain at the hole position (SP:2M TD:20ms).

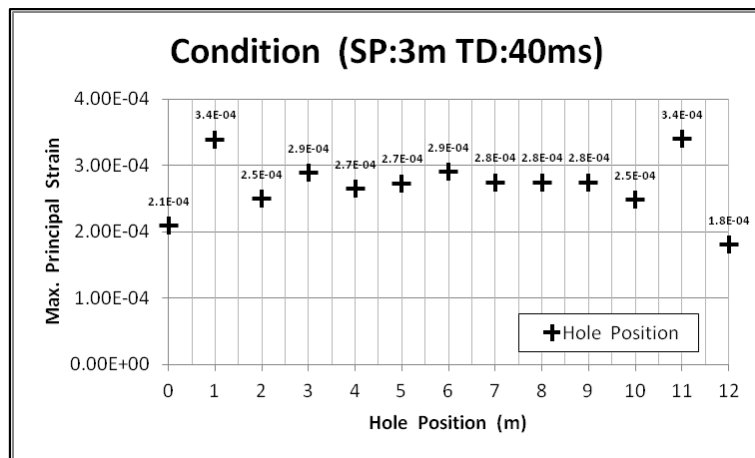


Fig. 14. Comparison of the maximum principal strain at the hole position (SP:3M TD:40ms).

부분은 장약장 중심부인 6m 지점으로서 7.6E-14 값을 나타냈다. Fig. 13에서 보여주는 것과 같이, 천공간격이 2m이고, 기폭시차가 20ms인 조건 하에서 얻어진 해석 절점의 최대주변형률 값을 비교해 보면, 장약장의 깊이에 따라 다른 값을 보였고, 천공간격 3m일 때보다 불규칙적인 값을 나타냈으며, 장약장의 중심부로 갈수록 작은 값을 나타냈다. 최대주변형률 값이 가장 큰 부분은 장약장 2m 지점으로서 7.9E-05 값을 나타냈고, 가장 작은 부분은 장약장 중심부인 6m 지점으로서 9.3E-12 값을 나타냈다. 일반적으로 장공발파에서 오차 없이 천공이 이루어졌다면 전열공이 발파될 때 인접공 내에서의 변형이 가장 작은 부분은 장약장 중심부로서 장공발파 작업 시 중기폭으로 기폭 시스템을 유지하는 것이 cut-off 방지에 효율적일 것으로 판단된다. Fig. 14에서 보여주는 것과 같이, 천공간격이 3m이고, 기폭시차가 40ms인 조건 하에서 얻어진 해석 절점의 최대주변형률 값을 비교해 보면, 장약장의 깊이에 따라 매우 불규칙적인 값을 보이는 것으로 나타났다. 다른 두 조건과는 달리 장약장의 깊이에 따라 전반적으로 큰 값을 나타냈고, 장약장의 시점부 및 중심부, 종점부에 따른 최대주변형률 값의 차이가 크지 않았다. 최대주변형률 값이 가장 큰 부분은 장약장 1m 및 11m 지점으로서 3.4E-04 값을 나타냈고, 가장 작은 부분은 장약장 종점부인 12m 지점으로서 1.8E-04 값을 나타냈다. 일반적으로 기폭시차가 길어지면 암반 내 응력장의 분포 범위도 커지므로 기폭시차가 짧은 경우보다 인접공에 미치는 변형 정도가 더욱 큰 것으로 판단되며, 장공발파의 경우 장약공과 장약공 사이의 뇌관 기폭시차 범위를 너무 넓게 설계하는 것은 바람직하지 않을 것으로 여겨진다.

4. 결론

본 연구에서는 장공발파 시 암반 내 응력장에 의한 변형 영향권을 확인하기 위하여 유한요소 프로그램으로 해석 모형을 모델링하여 전열공이 발파되었을 때 인접공 주변에서의 시간 증분에 따른 최대주변형률을 분석하고, 전열공과 인접공 간의 천공간격 및 기폭시차에 따른 최대주변형률을 비교하여 다음과 같은 결론을 도출하였다.

- 1) 장공발파 시 전열공의 기폭으로 발생하는 암반 내 응력장은 인접공 내 변형성에 영향을 줄 수 있으며, 전열공과 인접공 간의 천공간격 및 기폭시차에 따라 인접공 주변에서 최대주변형률 값의 변화를 나타냈다.
- 2) 장공발파에서 천공 오차가 없는 상태에서 발파가 진행된다면 전열공이 발파될 때 인접공 내에서의 변형이 가장 작은 부분은 장약장의 중심부로서 기폭 시스템을 중기폭으로 유지하는 것이 cut-off 방지에 효율적일 것으로 판단되며, 뇌관의 기폭시차가 길어지면 암반 내 응력장의 분포 범위도 커지므로 장약공과 장약공 사이의 기폭시차 범위를 넓게 설계하는 것은 바람직하지 않다.

본 연구는 장공발파에서 발생될 수 있는 발파 회선의 cut-off 및 폭약의 잔류에 대한 암반 내 발생 메커니즘을 규명하기 위해 2자유면 상의 암반을 유한요소 해석 프로그램으로 모델링하여 발파 시 전열공과 인접공 사이의 응력장에 따른 공내 변형 정도를 최대주변형률로 비교하여 수치적으로 분석한 것으로서, 실제 발파 현장에서의 암반 조건 및 설계 내용에 따라 달라질 수 있으며 추후 실규모 현장과 동일하게 모델링하여 실제적인 해석 시간 영역에서의 암반 거동 메커니즘 및 균열권 내 변형성 분석이 이루어져야 할 것이다.

참고문헌

1. 민형동, 정민수, 진연호, 박윤석, 2008, 소단면 터널에서 에멀전폭약의 사압현상과 대책, 화약·발파, Vol. 26, No. 2, pp. 29-37.
2. 유희룡, 2007, 구조물-유체-지반의 동적 상호작용 해석을 위한 유한요소 모델링, 공학박사학위 논문, 전북대학교, pp. 122-155.
3. 이기근, 김갑수, 양국정, 강대우, 허원호, 2012, 전방 자유면의 암반 이동에 관한 연구, 화약·발파, Vol. 30, No. 2, pp. 29-42.
4. 이승찬, 2005, 화약의 폭속이 발파에 미치는 영향 검토, 화약·발파, Vol. 23, No. 3, pp. 43-56.
5. 이춘우, 양형식, 송승곤, 2000, 천공패턴 및 기폭시차의 변화에 의한 파쇄암의 입도 분포 연구, 화약·발파, Vol. 18, No. 4, pp. 43-53.
6. 윤지선, 우택규, 김민우, 장영민, 2009, 응력장을 고려한 프리스플리팅 공법의 균열발생 원리에 대한 연구,

- 화약·발파, Vol. 27, No. 2, pp. 1-11.
7. 조영곤, 김희도, 안봉도, 2002, 장약조건에 따른 폭속 변화 연구, 화약·발파, Vol. 20, No. 1, pp. 61-66.
 8. Newmark, N.M., 1959, A method of computation for structural dynamics, Journal of the Engineering Mechanics Division, Vol. 85, pp. 67-94.
 9. Zaman, M.M., Desai, C.S., Drumm, E.C., 1984, Interface model for dynamic soil-structure interaction, Journal of Geotechnical Engineering, Vol. 110, pp. 1257-1273.



송정언
전북대학교 자원·에너지공학과
시간강사

Tel: 063-270-2358
E-mail: sjuda@jbnu.ac.kr



박 훈
전북대학교 자원·에너지공학과
겸임교수

Tel: 02-834-4590
E-mail: hujin@jbnu.ac.kr



김승곤
전북대학교 자원·에너지공학과
교수

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