

## 우발적 갱도폭발에 따른 다층 주방식 채광광산 구조요인별 피해 기여도 분석

고영훈<sup>1)</sup>, 양형식<sup>1)\*</sup>, 김승준<sup>1)</sup>

### Damage Contribution Rate Analysis by Accidental Tunnel Explosion at a Multi-layered Room and Pillar Mine

Young-Hun Ko, Hyung-Sik Yang, Seung-Jun Kim

**Abstract** In this paper, parametric studies are conducted to evaluate the contribute effect of multi layered room and pillar mine structures by underground accidental explosions. Influence of PPV(Peak Particle Velocity) obtained from large explosion at a multi layered room and pillar mine was numerically simulated by using AUTODYN. Parameters for contribution rate Analysis was analyzed by the robust design method.

Orthogonal array is  $L_9(3^4)$ , which was adopted in this study, the parameters were pillar height, pillar width, mine span and sill pillar of 3 levels. Results of analysis showed that bottom mine of vertical direction from explosion point are most affected by pillar height, followed by sill pillar thickness, mine span and pillar width. Parameters affecting adjacent mine of horizontal direction from explosion are in the order of pillar width, mine span, pillar height and sill pillar thickness.

**Key words** Multi layered Room and pillar mine, Accidental explosions, AUTODYN, Robust design, Peak particle velocity

**초 록** 본 연구에서는 다층 주방식 채광 광산에서 우발적 폭발이 일어났을 때 구조변수가 파괴(낙석 등)에 미치는 영향 및 기여도를 평가 분석하였다. 다층 주방식 광산에서 대형 폭발에 따른 최대진동속도 영향을 산출하기 위해 AUTODYN으로 수치해석을 수행하였으며, 각 인자들의 기여도 분석을 위해 강건설계 실험계획법을 이용하여 설계인자를 분석하였다. 분석에 사용된 직교배열은  $L_9(3^4)$  이었고 변수는 각각 3수준의 값을 갖는 광주의 높이, 광주의 폭, 갱도 폭, 바닥필라 두께 등으로 하였다. 분석결과 폭발원 갱도로 부터 하부레벨 갱도 천반에서 최대진동속도 발생에 가장 큰 영향을 미치는 것은 광주의 높이이며, 이어서 바닥필라, 갱도 폭, 광주의 폭 순으로 나타났다. 수평인접 갱도 측면중앙의 경우는 광주의 폭, 갱도 폭, 광주의 높이, 바닥필라의 두께 순으로 기여율이 평가되었다.

**핵심어** 다층 주방식 광산, 우발적 폭발, AUTODYN, 강건설계, 최대진동속도

## 1. 서 론

국내의 석회석 광산은 광체가 거의 수직으로 서 있

는 경우가 많아서 다층 주방식으로 생산하는 경우가 많다. 이 경우 편과 편 사이에는 불가피하게 천반을 남겨두게 되는데 그 두께가 채광장의 광주(pillar) 높이보다 두꺼운 경우가 많아 실제 채수율은 50%에 미치지 못하는 경우가 많다(김종관, 2014). 채수율을 높이기 위하여 편간 필라 및 광주의 크기를 줄이는 방법을 적용할 수 있지만, 극단적인 광주의 크기 제한은 발파작업에 따른 동적하중 등에 의해 인접공동 즉 상,

<sup>1)</sup> 전남대학교 에너지자원공학과

\* 교신저자 : hsyang@chonnam.ac.kr

접수일 : 2017년 8월 31일

심사 완료일 : 2017년 9월 7일

게재 승인일 : 2017년 9월 12일

하편 갱도 및 동일 레벨의 갱도에서 낙반, 붕락 등을 초래할 수 있다. 실제 낙반붕락에 의한 재해건수는 최근 3년 평균 20여건으로 다른 재해원인에 비해 발생 빈도가 적지 않은 편이다(KORES, 2015).

본 연구에서는 갱도 내 우발적 폭발과 같은 사고를 가정하였다. 실험계획법을 통한 각 해석모델들을 설정하고 수치해석을 통해 극한 폭발하중에 의한 인접 공동에서의 진동속도를 산출하였고, 산출된 진동속도를 망소특성 응답으로 하여 다층 주방식 광산의 구조요소별 기여도를 평가하였다.

## 2. 인자설계

### 2.1 실험계획법

인자의 영향과 민감성을 검토하기 위하여 강건설계법(김호성 외, 1992)을 채택하였다. 강건설계법은 인자들을 독립적으로 배열한 제한된 수의 실험을 통하여 경우의 수가 엄청나게 많은 실험을 하는 것과 같은 효과를 얻을 수 있도록 고안된 방법이다. Table 1은 주로 사용되는 직교배열들이다. 표에서  $L_8(2^7)$  직교배열은 2수준 즉 두 가지의 선택이 가능한 인자가 일곱 개 있을 때 가능한 인자의 조합은  $2^7 = 128$ 가지이지만 단지 8번의 실험만으로 모든 경우의 수에서 기대되는 결과와 경우에 따라서는 그들 간의 교호작용을 해석할 수 있고 최적의 조건을 찾을 수도 있다. 각 인

Table 1. Frequently used orthogonal arrays

| Orthogonal array              | Total case | Experiment | Remarks                 |
|-------------------------------|------------|------------|-------------------------|
| $L_4(2^3)$                    | 8          | 4          | 2 level parameter 3     |
| $L_8(2^7)$                    | 128        | 8          | 2 level parameter 7     |
| $L_9(3^4)$                    | 81         | 9          | 3 level parameter 4     |
| $L_{12}(2^{11})$              | 2,048      | 12         | 2 level parameter 11    |
| $L_{16}(2^{15})$              | 32,768     | 16         | 2 level parameter 15    |
| $L_{16}(4^5)$                 | 1,024      | 16         | 4 level parameter 5     |
| $L_{18}(2^1 \times 3^7)$      | 4,374      | 18         | 2 & 3 level parameter 8 |
| $L_{25}(5^6)$                 | 15,625     | 25         | 5 level parameter 6     |
| $L_{27}(3^{13})$              | 1,594,324  | 27         | 3 level parameter 13    |
| $L_{32}, L_{36}, L_{50}$ etc. |            |            | etc.                    |

자의 개별 효과와 최적화는 평균분석 ANOM 을 통하여 구할 수 있으며 인자들의 상대적 효과와 민감도는 분산분석 ANOVA를 통하여 구할 수 있다. 이러한 분석을 위하여 채택할 최종통계량은

$$\eta_i = -10 \log_{10}(\text{파라미터의 제곱평균}) \quad (1)$$

으로 정의되며 S/N비(신호 대 잡음비)로 불린다. 인자수준의 효과는 전체 평균으로부터 그 인자수준에 의한 결과의 편차로 정의된다.

### 2.2 구조인자 설정

다층 주방식 광산의 폭발하중에 대한 구조요소별 기여도 분석을 위해서 선택한 인자는 광주의 높이(Ph), 광주의 폭(Pw), 갱도 폭(Rw), 편간 필라(SP)의 두께로(Fig. 1) 3수준 4인자의 직교배열  $L_9(3^4)$ 를 선택하였다(Table 2). 제 2수준의 경우 전라남도 장성의 K시멘트 광산의 일반적인 구조 크기이며, 수준간 편차결정은 해당광산의 최소, 최대치의 구조요소별 크기를 참고하여 결정하였다.

기여도 분석을 위한 최종통계량은 수치해석을 통해 산출하였고, 특성치는 최대 진동속도를 선택하였다.

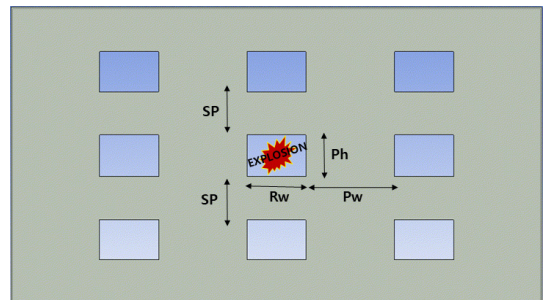


Fig. 1. Schematic of Parameter model

Table 2. Three levels for design parameters

| Level | Pillar height(m) | Pillar width(m) | Mine span(m) | Sill pillar thickness(m) |
|-------|------------------|-----------------|--------------|--------------------------|
| 1     | 5                | 24              | 8            | 8                        |
| 2     | 8                | 35              | 12           | 12                       |
| 3     | 11               | 46              | 16           | 16                       |

### 3. 수치해석

Thoma) 콘크리트 모델은 일반적인 취성재료를 분석하기 위한 모델이다. RHT 콘크리트 모델은 AUTODYN, LS-DYNA와 같은 발파해석 프로그램에서 압석과 같은 취성재료의 물성모델로 사용되고 있다.

#### 3.1 적용물성

Riedel 등에 의해 정립된 RHT(Reidel-Hermaier-

**Table 3.** Numerical Constants used in AUTODYN for Limestone (Nariseti, 2013)

| Parameter                          | Value  | Unit              |
|------------------------------------|--------|-------------------|
| Reference Density                  | 2.66   | g/cm <sup>3</sup> |
| EOS                                |        |                   |
| Bulk Modulus (A1)                  | 71.2   | GPa               |
| Parameter A2                       | 49.40  | GPa               |
| Parameter A3                       | 11.62  | GPa               |
| Parameter B0                       | 1.22   | -                 |
| Parameter B1                       | 1.22   | -                 |
| Parameter T1                       | 43.87  | GPa               |
| Parameter T2                       | 0.00   | -                 |
| Reference Temperature              | 300.00 | K                 |
| Specific Heat                      | 654.00 | J/KgK             |
| Thermal Conductivity               | 0.00   | -                 |
| Strength                           |        |                   |
| Shear Modulus (G)                  | 24.2   | GPa               |
| Compressive Strength (fc)          | 100    | MPa               |
| Tensile Strength (ft/fc)           | 0.05   | -                 |
| Shear Strength (fs/fc)             | 0.07   | -                 |
| Intact Failure Surface Constant A  | 0.80   | -                 |
| Intact Failure Surface Exponent N  | 0.61   | -                 |
| Tens/Comp Meridian Ratio (Q)       | 0.72   | -                 |
| Brittle to Ductile Transition      | 0.01   | -                 |
| G (elas.)/(elas.-plas.)            | 1.10   | -                 |
| Elastic Strength/ft                | 0.40   | -                 |
| Elastic Strength/fc                | 0.85   | -                 |
| Fractured Strength Constant B      | 2.67   | -                 |
| Fractured Strength Constant M      | 0.61   | -                 |
| Compressive Strain Rate Exp. Delta | 0.025  | -                 |
| Tensile Strain Rate Exp. Delta     | 0.045  | -                 |
| Failure                            |        |                   |
| Damage Constant D1                 | 0.005  | -                 |
| Damage Constant D2                 | 0.7    | -                 |
| Minimum Strain to Failure          | 0.06   | -                 |
| Residual Shear Modulus Fraction    | 0.250  | -                 |
| Tensile Failure                    | Hydro  | -                 |

RHT 모델은 동적하중을 받는 콘크리트의 모델링에 특히 유용하며, 암석이나 세라믹 등 콘크리트 이외의 암석과 같은 취성재료를 모델링하는데도 사용된다. 압력 경화, 변형률 경화, 변형률속도 경화, 손상에 따른 변형률 연화 및 전단강도 감소의 영향을 고려하고 있다(Riedel et al, 1999).

폭약주위 갱도공간에는 공기를 모델링 하였다. 공기의 대기조건 부여를 위해 내부에너지를 표준대기조건인  $2.068 \times 10^5 \text{ J/kg}$ 을 적용하였고, 이상기체 상태방정식(EOS)을 적용하였다.

### 3.2 해석조건

일반적으로 다층 주방식 채광 광산은 광주축이 일치하며 비교적 고른 분포를 하고 있어서 광산골격을 단순화 하여 평면변형 문제로 간주할 수 있다. 해석은 Table 3 직교배열 조건에 따라 2차원 모델을 구성하여 해석하였다(Fig. 2). 각 모델의 ALE(Arbitrary Lagrange Euler) 암반 외부경계는 무한한 영역을 위해 Transmit 경계조건으로 부여하였으며, Euler 폭발영역 외부는 Flow out 조건을 적용하였다.

대규모 폭발에 의한 지하구조물의 진동영향은 많은 연구자들에 의해 현장실험을 통해 연구되었다. 미 육군 공병대는 터널과 같은 지하 구조물에 대해 대규모

Table 4. JWL, C-J Characteristics values (ANFO)

| A (GPa) | B (GPa) | $R_1$ | $R_2$ | $\omega$ |
|---------|---------|-------|-------|----------|
| 49.46   | 1.891   | 3.907 | 1.118 | 0.33333  |

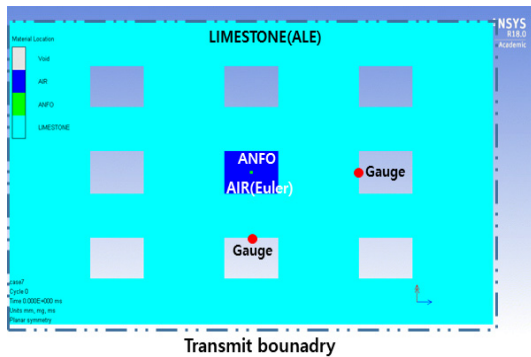


Fig. 2. Model geometry and history points layout for the AUTODYN case 7

폭발실험을 통해 네 그룹으로 손상 영역별 최대 진동속도(peak particle velocity)범위를 분류하였고, Table 5와 같다(Hendron, 1977).

Kendorski(1973)는 인접갱도에서의 폭발에 따른 최대 진동속도가 1.22 m/s를 상회할 때 터널 주변 및 숏크리트 라이닝에 균열이 발생한다고 하였다. 본 연구에서는 Table 2와 같이 인자별 수준범위에 따라 수치해석 모델링하였고, 수치해석상 게이지 측정위치인 하부갱도 천반과, 인접갱도 측면의 최대진동속도 범위는 각각 Table 5의 국부파괴 범위와 인접갱도 균열 발생의 1.22 m/s를 기준으로 직경 100cm, ANFO를 각 모델 중앙에 모델링 하여 해석하였다.

### 3.3 해석결과

총 9회의 AUTODYN 해석을 하였으며, 해석모델 중앙 갱도를 기준으로 하부레벨 천반중앙과 수평인접갱도 측면중앙에 수치해석상 게이지를 설정하여 PPV를 산출하였다(Table 6).

Table 5. Explosion tests, sandstone tunnel

| Damage zone | Damage               | PPV(m/s)  |
|-------------|----------------------|-----------|
| 1           | Tight closure        | NA        |
| 2           | General failure      | 12        |
| 3           | Local failure        | 4         |
| 4           | Intermittent failure | 0.9 ~ 1.8 |

Table 6. PPV of AUTODYN numerical analysis result

| no | Pillar height (m) | Pillar width (m) | Mine span (m) | Sill pillar thickness (m) | PPV(m/s) |         |
|----|-------------------|------------------|---------------|---------------------------|----------|---------|
|    |                   |                  |               |                           | Gauge 1  | Gauge 2 |
| 1  | 5                 | 24               | 8             | 8                         | 6.41     | 2.23    |
| 2  | 5                 | 35               | 12            | 12                        | 4.06     | 1.46    |
| 3  | 5                 | 46               | 16            | 16                        | 4.01     | 0.85    |
| 4  | 8                 | 24               | 12            | 16                        | 2.53     | 1.90    |
| 5  | 8                 | 35               | 16            | 8                         | 3.87     | 1.32    |
| 6  | 8                 | 46               | 8             | 12                        | 3.12     | 1.39    |
| 7  | 11                | 24               | 16            | 12                        | 2.41     | 1.44    |
| 8  | 11                | 35               | 8             | 16                        | 2.31     | 1.45    |
| 9  | 11                | 46               | 12            | 8                         | 2.75     | 0.98    |

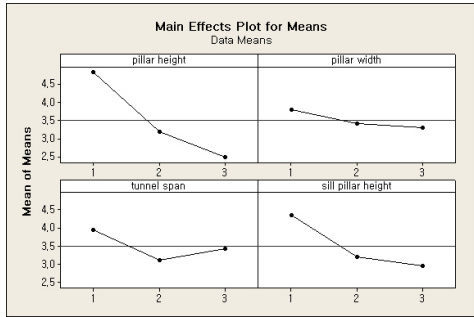


Fig. 6. Main effect plot for gauge 1.

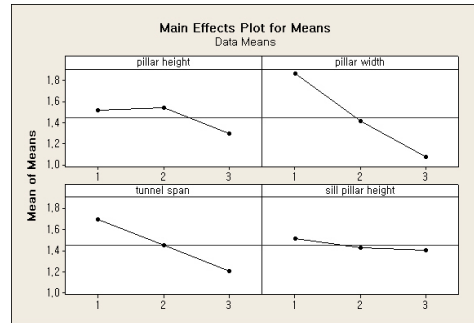


Fig. 7. Main effect plot for gauge 2.

Table 7. Effect of parameters on PPV(gauge 1)

| No.     | Pillar height | Pillar width | Mine span | Sill pillar thickness | PPV(m/s) |
|---------|---------------|--------------|-----------|-----------------------|----------|
| 1       | 1             | 1            | 1         | 1                     | 6.41     |
| 2       | 1             | 2            | 2         | 2                     | 4.06     |
| 3       | 1             | 3            | 3         | 3                     | 4.01     |
| 4       | 2             | 1            | 2         | 3                     | 2.53     |
| 5       | 2             | 2            | 3         | 1                     | 3.87     |
| 6       | 2             | 3            | 1         | 2                     | 3.12     |
| 7       | 3             | 1            | 3         | 2                     | 2.41     |
| 8       | 3             | 2            | 1         | 3                     | 2.31     |
| 9       | 3             | 3            | 2         | 1                     | 2.75     |
| level 1 | 4.830         | 3.782        | 3.947     | 4.345                 |          |
| level 2 | 3.177         | 3.417        | 3.115     | 3.199                 |          |
| level 3 | 2.488         | 3.296        | 3.432     | 2.951                 |          |
| Delta   | 2.342         | 0.487        | 0.832     | 1.394                 |          |
| Rank    | 1             | 4            | 3         | 2                     |          |

Table 8. Effect of parameters on PPV(gauge 2)

| No.     | Pillar height | Pillar width | Mine span | Sill pillar thickness | PPV(m/s) |
|---------|---------------|--------------|-----------|-----------------------|----------|
| 1       | 1             | 1            | 1         | 1                     | 2.23     |
| 2       | 1             | 2            | 2         | 2                     | 1.46     |
| 3       | 1             | 3            | 3         | 3                     | 0.85     |
| 4       | 2             | 1            | 2         | 3                     | 1.90     |
| 5       | 2             | 2            | 3         | 1                     | 1.32     |
| 6       | 2             | 3            | 1         | 2                     | 1.38     |
| 7       | 3             | 1            | 3         | 2                     | 1.44     |
| 8       | 3             | 2            | 1         | 3                     | 1.46     |
| 9       | 3             | 3            | 2         | 1                     | 0.98     |
| level 1 | 1.514         | 1.858        | 1.693     | 1.512                 |          |
| level 2 | 1.537         | 1.413        | 1.450     | 1.429                 |          |
| level 3 | 1.295         | 1.074        | 1.203     | 1.404                 |          |
| Delta   | 0.242         | 0.784        | 0.489     | 0.108                 |          |
| Rank    | 3             | 1            | 2         | 4                     |          |

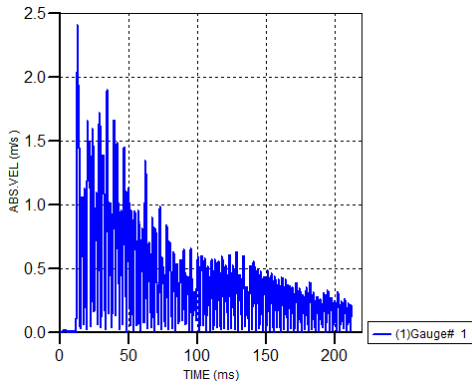


Fig. 3. Peak particle velocity of gauge 1(case 7).

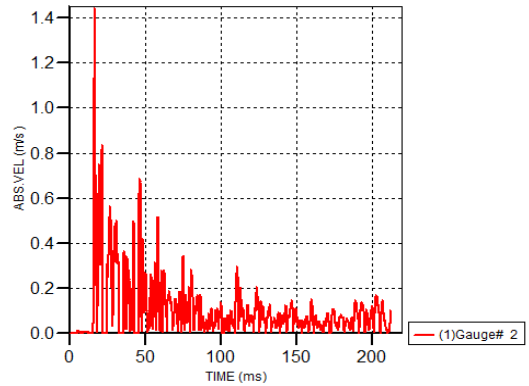


Fig. 4. Peak particle velocity of gauge 2(case 7).

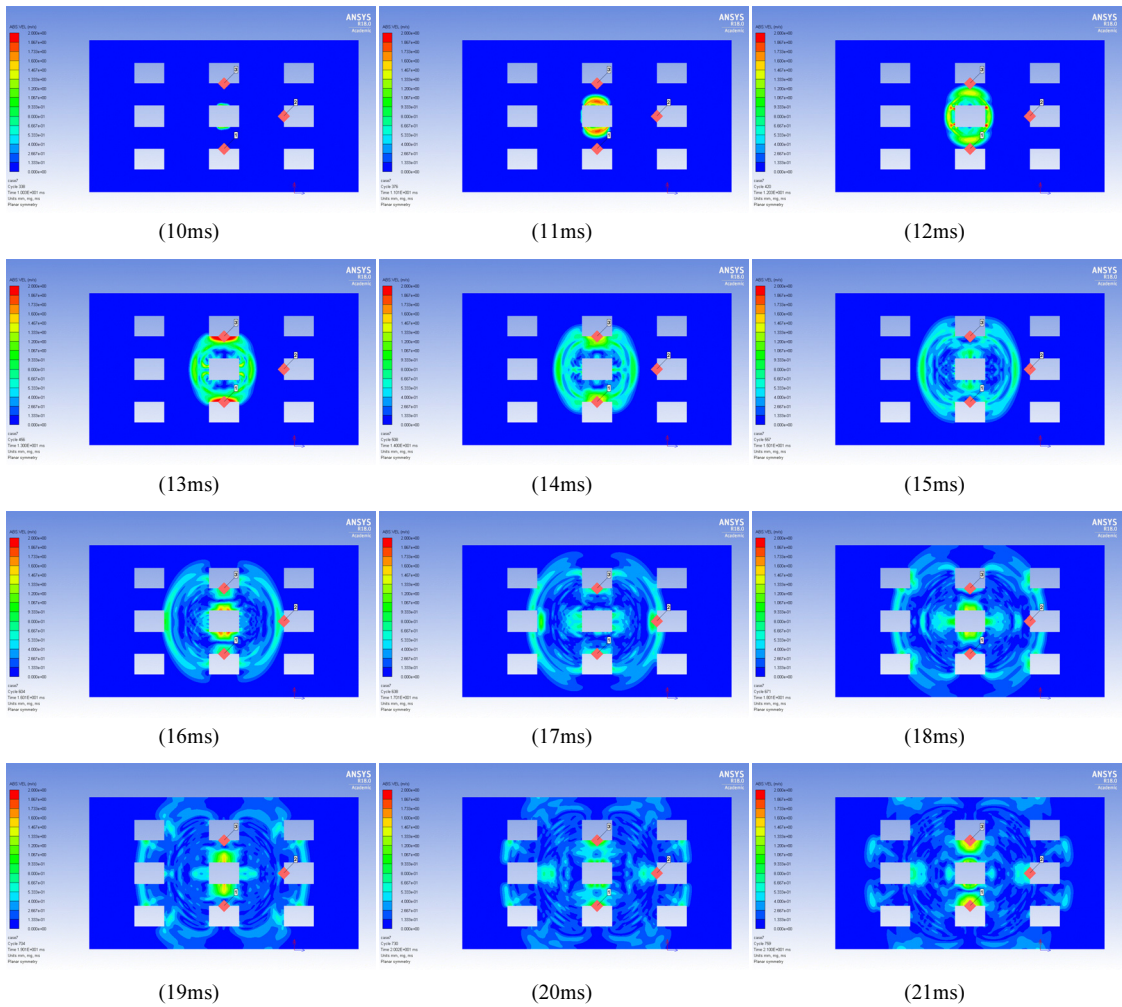


Fig. 5. The contour plot for PPV after explosion(case 7).

#### 4. 결과분석

다층 주방식 채광광산 구조 인자 해석 모델별 계측 위치의 최대진동속도 발생과 관련된 주효과 분석의 결과는 Fig. 6, 7과 같다.

폭발갱도 하부레벨 갱도 천반에서 최대진동속도 발생에 가장 큰 영향을 미치는 것은 광주의 높이이며, 이어서 편간 필라, 갱도 폭, 광주의 폭인 것을 알 수 있다(Table 7). 주어진 범위 내에서 변동 기여율은 광주의 높이가 46.0%, 편간 필라 27.5%, 갱도 폭 16.5%, 광주 폭 9.6% 순이었다.

수평인접 갱도 측면중앙의 경우 광주의 폭 48.0%, 갱도 폭 30.0%, 광주의 높이 15.0%, 편간 필라 6.0% 순으로 기여율이 평가되었다.

#### 5. 결론

우발적 갱도폭발 상황을 가정하여 AUTODYN으로 수치해석을 수행하였으며, 강건설계 실험계획법을 이용하여 다층 주방식 광산의 구조 요소별 기여도를 평가하였다. 분석에 사용된 직교배열은  $L_9(3^4)$ 를 선택하였으며, 변수는 각각 3 수준의 값을 갖는 광주의 높이, 광주의 폭, 갱도 폭, 편간 필라의 두께로 하였다. 암반구조의 불연속 조건 등을 고려하지는 않았지만 경향의 기여도 분석을 통해 다음의 결과를 얻을 수 있었다.

- 1) 폭발원 갱도로 부터 하부레벨 갱도 천반에서 최대진동속도 발생에 가장 큰 영향을 미치는 것은 광주의 높이이며, 이어서 편간 필라, 갱도 폭, 광주의 폭 순으로 나타났다.
- 2) 수평인접 갱도 측면중앙 위치의 경우 광주의 폭, 갱도 폭, 광주의 높이, 편간 필라의 두께 순으로 기여율이 평가되었다.
- 3) 폭발갱도로부터 하부레벨 갱도 천반에서의 발생 진동속도를 예를 들었을 때, 폭발갱도에서 수직요소인 편간 필라 두께, 광주의 높이 등이

최대진동속도 발생에 큰 영향을 미치는 주요인자이다. 그러나 폭발갱도에서 수평요소인 갱도 폭, 광주의 폭 두 요소도 하부레벨 갱도 천반에서의 진동속도 발생의 기여도에서 각각 16.5 %, 9.1 %의 영향을 보였다. 이는 폭발에 따른 충격 파가 암반을 통해 전파되고, 인접공동의 매질경계에 도달하였을 때 각각의 반사 및 교란 등의 작용으로 판단된다.

#### 사 사

“이 논문은 2016년도 정부(교육부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 기초연구사업임 (No. NRF-2016R1A6A3A11931164)”

#### 참고문헌

1. 김종관, 2014, 주방식 채광 석회석 광산의 응력상태와 지보에 관한 연구, 박사학위논문, 전남대학교 일반대학원.
2. 한국광물자원공사, 2015, 광산재해예방매뉴얼, pp. 22.
3. ANSYS, 2010, Autodyn User's Subroutines Tutorial, pp. 50.
4. Chanakya Nariseti, 2013, Quantification of Damage in Selected Rocks due to Impact with Tungsten Carbide Bits, Masters Thesis, University of Toronto, United states of America.
5. Hendron, A.J., 1977. Engineering of rock blasting on civil projects. In: Hall, W.J. (Ed.), Structural and Geotechnical Mechanics, A Volume Honoring NM Newmark. Prentice Hall, New Jersey.
6. Kendorski, F. S., Jude, C.V., Duncan, W. M., 1973. Effect of blasting on shotcrete drift linings. Min. Eng. 25 (12), pp. 38-41.
7. Riedel, W., Thomas, K., Hiermaier, S., Schmolinske, E., 1999, Penetration of Reinforced Concrete by BETA-B-500 Numerical Analysis using a New Macroscopic Concrete Model for Hydrocodes, 9th International Symposium on the Interaction of the Effects of Munitions with Structures, Berlin-Strausberg, Germany, pp. 315-322.



**고 영 훈**

전남대학교 에너지자원공학과  
박사후연구원

Tel: 062-530-0824  
E-mail: dddd8401@chonnam.ac.kr



**양 형 식**

전남대학교 에너지자원공학과 교수

Tel: 062-530-1724  
E-mail: hsyang@jnu.ac.kr



**김 승 준**

전남대학교 에너지자원공학과  
박사수료

Tel: 062-530-0824  
E-mail: jangdog99@naver.com