

## 지하채굴공동에서 굴착방법에 따른 발파진동의 특성에 관한 연구

강추원 · 류복현<sup>1)</sup>

### 1. 서 론

국내 석회석 광산은 환경문제 등으로 인하여 노천채광에서 지하채굴로 전환되면서, 노천채광과 같은 대량 생산을 유지하기 위하여 갱도가 대형화 되고 있고, 이에 따라 갱도 및 광주의 규모 그리고 채굴방법 등에서 많은 문제가 발생하고 있다. 또한 대부분 채광 갱도와 광주 크기의 설계는 경험적으로 결정하고 있는 상황이다. 이러한 경험적인 방법으로 채굴을 수행할 경우 정확한 암반의 특성 파악없이 결정된 갱도는 광주의 안정성을 보장하기 어려운 상황이다.<sup>1)</sup>

채광을 위한 발파작업 시 발파진동으로 인한 갱도와 광주의 피로현상에 의해 채광갱도 주변에 위치한 갱도와 광주는 변형 및 파괴가 발생되며, 이로 인해 채굴공동의 붕락현상이 발생되기도 한다. 이런 발파진동의 특성을 분석하여 이를 발파방법에 반영함으로써 안정적인 갱도와 광주설계를 수행하여 안전한 채광작업과 효율적인 광산개발과 채광실수율을 증가시키기 위함이며, 또한 광주의 2차적 채굴을 포기하여 영구히 남겨두는 영구광주법을 채택한 채광장이라면 채수율을 크게 할 필요가 있어 설계된 광주의 크기를 최소로 제한하고 채굴폭을 증가시켜 광산실수율을 더욱 향상시키기 위함이다. 그리고 광산은 터널과 마찬가지로 안정된 초기응력 상태의 암반을 인위적으로 굴착하여 만드는 것으로 채굴로 인한 주변 암반의 이완 및 지지력의 저하상태를 정확히 평가하고 파악하는 것이 갱도와 광주의 안정성을 평가하는 매우 중요한 요소이다. 따라서 갱도 발파시 채굴 단면 주변 암반의 손상상태를 측정하여 평가할 필요가 있다.

이에 본 연구는 A갱도와 B갱도를 동시 발파하여 굴착했을 때와 B갱도 내에서 좌우반 갱도와 사갱을 동시 발파하여 굴착했을 때(이후로부터 EM-I), A갱도와 B갱도를 다단 발파하여 굴착했을 때(이후로부터 EM-II) 그리고 A갱도와 B갱도를 단독 발파하여 굴착했을 때(이후로부터 EM-III)의 발파진동을 계측하여 각각의 굴착방법에 따라 발파진동속을 산출하여 노모그램 분석과 암반손상권 분석을 실시하여 지하채굴공동에서 굴착방법에 따른 발파진동의 특성을 규명하고자 함에 있다.

1) 조선대학교 자원공학과

## 2. 연구지역의 지형

본 연구지역은 충북 제천시 두학동 일대에 속하는 석회석 광산으로써 광체 양상은 가창산 향사, 두학동 복향사 및 기동리 향사 구조로 대분되며 현재 가창산 향사 구역에 410갱을 개설하여 1·2·3 중단과 하 1·2·3단에서 채광중이다(Fig. 1 참조).<sup>2)</sup>

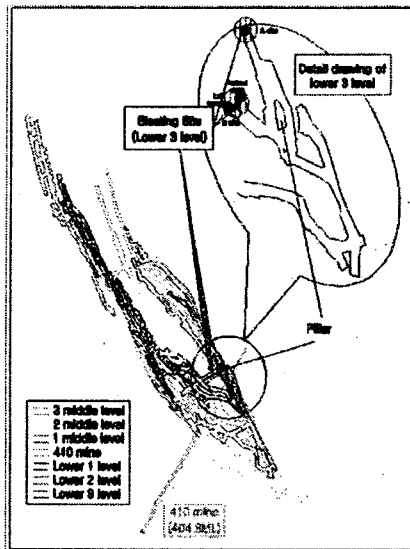


Fig. 1. Mine map of study area

## 3. 발파패턴 및 굴착방법

### 3.1 발파패턴

본 연구지역인 석회석 광산의 410갱 하3단의 A갱도와 B갱도는 6~10m(B)×6m(H) 규격의 막장을 JUMBO DRILL로 천공한다. 천공경은  $\Phi 45\text{mm}$ , 공 간격은 0.8~1.8m, 최소저항선은 0.8~1.6m이다. 그리고 과광회수율을 높이기 위한 V-CUT방식을 채택하고, 심발각도는 60~70°, 천공장은 3.8m, 굴진장은 3.5m이다. 공당 장약량은 전폭약 New Emulite 150 ( $\Phi 25$ ) 1ea(0.1kg)과 ANFO 3.00~3.33kg/hole을 사용한다. 그리고 ANFO CHARGER로 화약을 장전 발파를 한다(Fig. 2 참조).<sup>3)</sup>

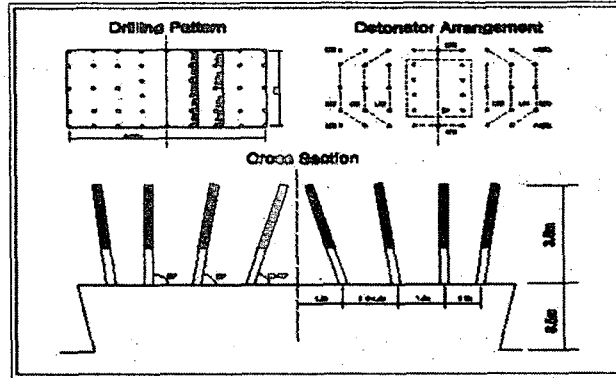


Fig. 2. Blasting pattern in study area

### 3.2 굴착방법

- Excavation Method-I : A갱도와 B갱도를 동시에 발파하여 굴착했을 경우와 B갱도 내에서 좌우반 갱도와 사갱을 동시에 발파하여 굴착했을 경우(이후로 EM-I 이라 함)
- Excavation Method-II : A갱도와 B갱도를 다단발파로 굴착했을 경우(이후로 EM-II라 함)
- Excavation Method-III : A갱도 혹은 B갱도를 단일 발파하여 굴착했을 경우(이후로 EM-III라 함)

## 4. 계측방법 및 굴착방법별 분석

### 4.1 계측방법

본 연구에 사용된 발파진동 계측기기로는 Instantel INC.의 BlastMate Series인 DS-477 과 Minimate plus(077) 그리고 Thomas Instruments사의 VMS200(C-1, C-2)을 사용하였다. 측정기는 광주를 기준으로 하여 일직선상으로 10~20m의 일정한 간격을 두고 설치하였으며, 계측기의 센서는 모두 광산 바닥 암반에 고정하였다.

본 연구지역에서 굴착방법별 획득한 데이터 수로는 EM-I 은 총 21개, EM-II는 총 12개 그리고 EM-III는 총 41개를 획득하였다.

### 4.2 굴착방법별 분석결과

본 연구지역인 석회석 광산에서 EM-I, II, III 별로 시행했을 경우를 구분하여 각각의 발파진동예상식을 다음과 같이 산출하였다.

- Excavation Method- I 의 발파진동예상식

회귀분석에 의해서 입지상수  $K$ 와  $n$ 을 구하기 위하여 최대진동속도와 환산거리의 log-log 1차 상관관계를 이용하여 전산처리하여 도출한 발파진동예상식은 다음과 같다.

$$V = 2159.268 \left( \frac{D}{\sqrt{W}} \right)^{-1.549} \quad r^2 = 0.853 \quad (1)$$

$$V = 4770.012 \left( \frac{D}{\sqrt[3]{W}} \right)^{-1.527} \quad r^2 = 0.859 \quad (2)$$

식 (1)과 (2)는 95%의 신뢰도를 가지는 식으로  $K$ 값은 자승근이 2159.268, 삼승근은 4770.012로 나타났으며,  $n$ 값은 각각 -1.549, -1.527로 나타났다. 그리고 결정계수는 자승근은 0.853, 삼승근은 0.859로 비교적 높은 상관성을 보여주고 있다(Fig. 3 참조).

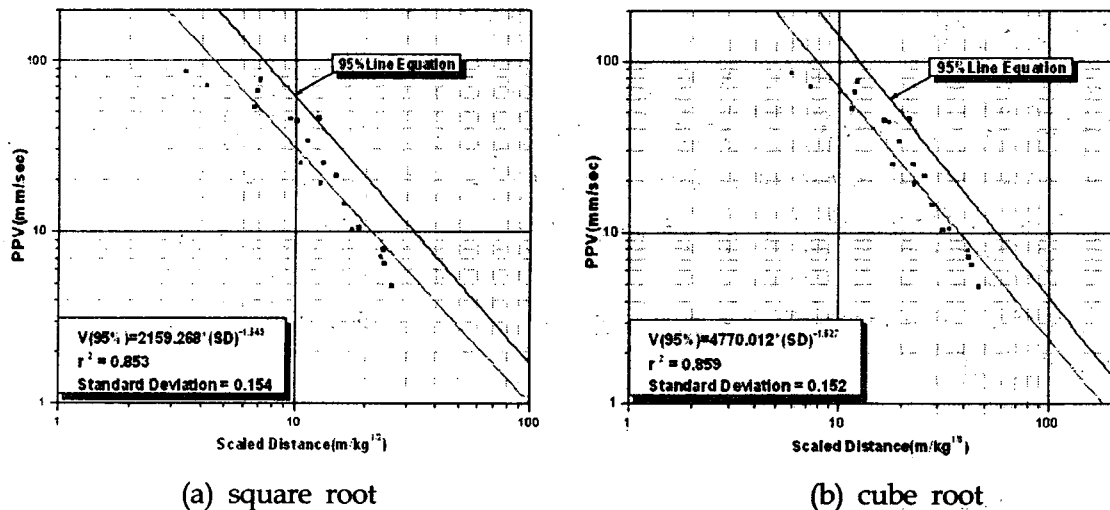


Fig. 3. Relationship between peak particle velocity and scaled distance by EM- I

- Excavation Method- II 의 발파진동예상식

회귀분석에 의해서 입지상수  $K$ 와  $n$ 을 구하기 위하여 최대진동속도와 환산거리의 log-log 1차 상관관계를 이용하여 전산처리하여 도출한 발파진동예상식은 다음과 같다.

$$V = 2049.548 \left( \frac{D}{\sqrt{W}} \right)^{-1.469} \quad r^2 = 0.895 \quad (3)$$

$$V = 4611.301 \left( \frac{D}{\sqrt[3]{W}} \right)^{-1.499} \quad r^2 = 0.895 \quad (4)$$

식 (3)과 (4)는 95%의 신뢰도를 가지는 식으로  $K$ 값은 자승근이 2049.548, 삼승근은 4611.301로 나타났으며,  $n$ 값은 각각 -1.469, -1.499로 나타났다. 그리고 결정계수는 자승근, 삼승근 모두 0.895로 비교적 높은 상관성을 보여주고 있다(Fig. 4 참조).

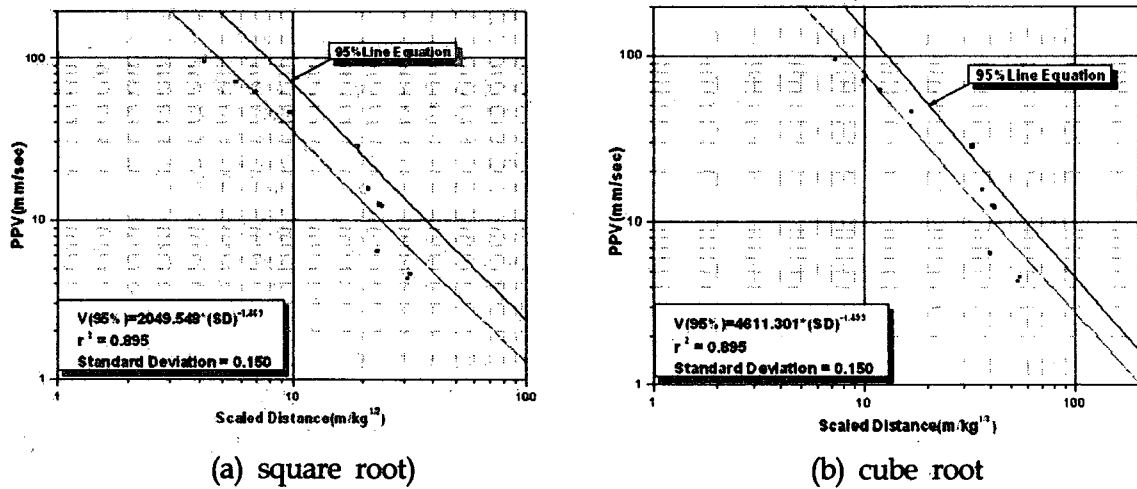


Fig. 4. Relationship between peak particle velocity and scaled distance by EM-II

- Excavation Method-III의 발파진동예상식

회귀분석에 의해서 입지상수  $K$ 와  $n$ 을 구하기 위하여 최대진동속도와 환산거리의 log-log 1차 상관관계를 이용하여 전산처리하여 도출한 발파진동예상식은 다음과 같다.

$$V = 1747.381 \left( \frac{D}{\sqrt{W}} \right)^{-1.513} \quad r^2 = 0.905 \quad (5)$$

$$V = 4074.745 \left( \frac{D}{\sqrt[3]{W}} \right)^{-1.516} \quad r^2 = 0.907 \quad (6)$$

식 (5)과 (6)은 95%의 신뢰도를 가지는 식으로  $K$ 값은 자승근이 1747.381, 삼승근은 4074.745로 나타났으며,  $n$ 값은 각각 -1.513, -1.516으로 나타났다. 그리고 결정계수는 자승근은 0.905, 삼승근은 0.907로 비교적 높은 상관성을 보여주고 있다(Fig. 5 참조).

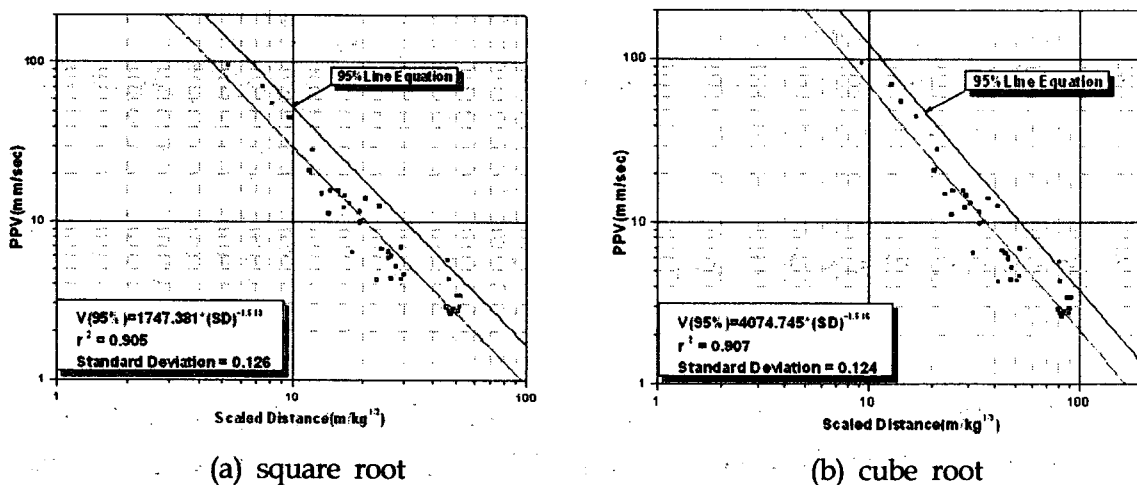


Fig. 5. Relationship between peak particle velocity and scaled distance by EM-III

### 4.3 노모그램을 이용한 결과분석

본 연구에서는 측정과의 거리 및 작업조건을 고려하여 자승근과 삼승근 환산거리를 이용하여 PVS(Peak Vector Sum)와 SD와의 관계를 나타내는 노모그램을 log-log 좌표 상에 나타내었다.

발파진동속도는 지발당 최대장약량과 폭원으로부터 거리를 변수로 하는 환산거리의 함수로 표시될 수 있는데, 그 관계식은 식 (7)과 같다. 이 식에서 진동속도와 환산거리는 비선형적 관계이나 양변에 로그를 취하면 다음과 같은 선형의 식으로 변환할 수 있다.

$$\log V = \log K + n \log(SD) \quad (7)$$

Fig. 6에는 EM-I, EM-II, EM-III 경우의 자승근과 삼승근의 PVS와 SD의 관계를 나타내었다. 이 그래프 모두 A경도 혹은 B경도의 단독 발파할 때의 굴착방법인 EM-III의 Line이 가장 낮게 나타났다.

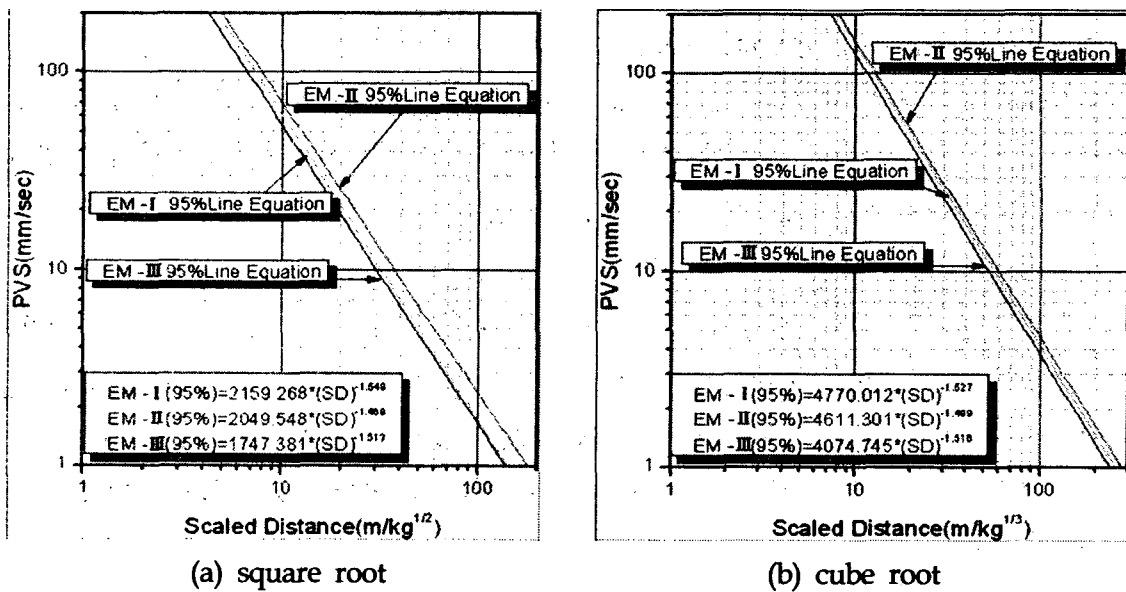


Fig. 6. Relationship between peak Velocity sum and scaled distance by EM-I, II, III of waveform

## 5. 굴착방법별 암반손상권 분석

### 5.1 개요

굴착에 의해 영향을 받는 영역인 암반손상·교란영역(Disturbed Rock Zone, DRZ 또는 Excavation Disturbed Zone, EDZ)은 터널주변의 암반이 모암과 다른 특성을 나타내는 영역으로 파괴영역(failure zone), 손상영역(damage zone) 및 교란영역(disturbed zone)을

모두 포함하는 영역을 의미하는데 굴착방법, 현지응력, 암반상태, 터널의 형상 및 위치 등에 따라서 그 특성과 범위가 다르게 나타난다. 파괴영역은 암반블록이 암반으로부터 완전히 분리된 영역이고, 손상영역은 미소파괴가 발생하여 변형계수의 감소, 투수계수의 증가 등과 같은 암반특성의 영구적인 변화가 발생하는 영역이며 교란영역은 굴착에 의한 응력재분배 등으로 인하여 응력 또는 수리적 특성과 같은 상태변화가 발생하는 영역으로 손상영역과는 달리 암반특성의 변화는 크지 않거나 회복될 수 있는 영역으로 정의된다.<sup>5)</sup>

본 연구에서는 TunDesign Ver 3.0을 사용하여 암반손상권 분석을 실시하였다.

## 5.2 암반손상권 분석결과

손상이 발생할 때의 임계진동속도와 같게 되는 거리는 암반손상권 범위이다.<sup>5)</sup>

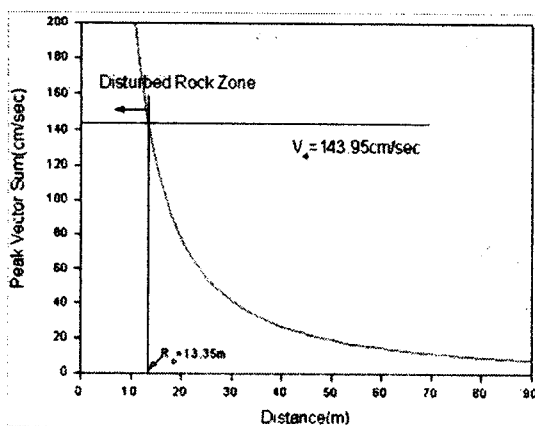
- 본 계산에 적용된 최대발파진동속도식은 다음과 같다.

$$V = 4770.012 \left( \frac{D}{3\sqrt{W}} \right)^{-1.527} \quad : \text{EM-I} \quad (8)$$

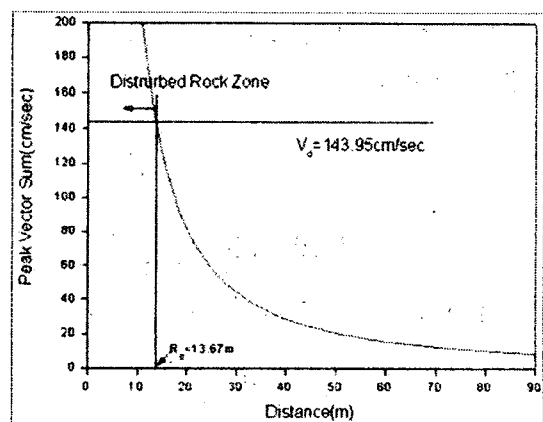
$$V = 4611.301 \left( \frac{D}{3\sqrt{W}} \right)^{-1.499} \quad : \text{EM-II} \quad (9)$$

$$V = 4074.745 \left( \frac{D}{3\sqrt{W}} \right)^{-1.516} \quad : \text{EM-III} \quad (10)$$

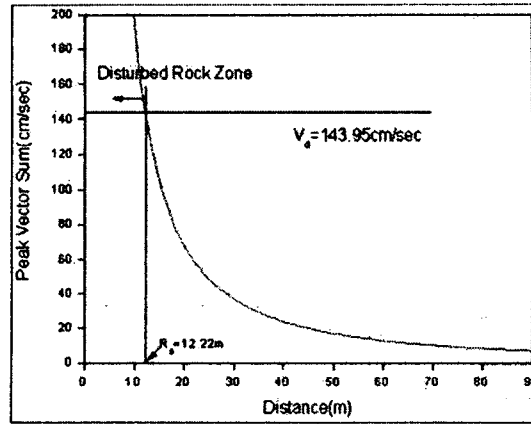
Fig. 7과 같이 손상이 발생할 때의 임계진동속도( $V_d$ )는 143.95cm/sec 이고 EM-I의 암반 손상영역권은 13.35m, EM-II의 암반 손상영역권은 13.67m, EM-III의 암반 손상영역권은 12.22m 이내에 발생하게 될 것으로 예측 할 수 있다.



(a) EM-I



(b) EM-II



(c) EM-III

Fig. 7. Disturbed rock zone

## 6. 결론

본 연구는 지하채굴공동에서 굴착방법에 따른 발파진동의 특성에 관한 연구로써 각 굴착방법별로 측정된 발파진동데이터를 바탕으로 발파진동식을 산출하고 그에 따라 노모그램분석을 실시하고 발파진동속도로 예측한 암반손상권 영역을 분석하였다. 그리하여 지하채굴공동의 굴착방법에 따른 발파진동의 특성을 파악하여 비교 분석한 결론은 다음과 같다.

(1) 본 연구에서 95%의 신뢰수준을 갖는 진동 예상식은 다음과 같다.

1) A갱도와 B갱도 혹은 B갱도 내에서 좌운반갱도와 사갱을 동시에 발파하여 굴착했을 경우 (EM- I)

$$V = 2159.268 \left( \frac{D}{\sqrt{W}} \right)^{-1.549} \quad r^2 = 0.853$$

$$V = 4770.012 \left( \frac{D}{3\sqrt{W}} \right)^{-1.527} \quad r^2 = 0.859$$

2) A갱도와 B갱도를 다단 발파하여 굴착했을 경우 (EM-II)

$$V = 2049.548 \left( \frac{D}{\sqrt{W}} \right)^{-1.469} \quad r^2 = 0.895$$

$$V = 4611.301 \left( \frac{D}{3\sqrt{W}} \right)^{-1.499} \quad r^2 = 0.895$$



3) A갱도 혹은 B갱도(좌운반갱도, 사갱)를 단일 발파하여 굴착했을 경우 (EM-III)

$$V = 1747.381 \left( \frac{D}{\sqrt{W}} \right)^{-1.513} \quad r^2 = 0.905$$

$$V = 4074.745 \left( \frac{D}{\sqrt[3]{W}} \right)^{-1.516} \quad r^2 = 0.907$$

(2) 본 연구에서 노모그램을 이용한 분석결과 자승근과 삼승근 모두 A갱도와 B갱도를 단일 발파하여 굴착했을 경우인 EM-III의 Line이 가장 낮게 나타나는 것으로 보아 EM-III의 굴착방법이 갱도와 광주에 가장 안정한 굴착방법으로 판단된다.

(3) 본 연구에서 굴착순서별 암반손상권 분석 결과 손상이 발생할 때의 임계진동속도 ( $V_d$ )는 143.95cm/sec 이고 EM-I의 암반 손상영역권은 13.35m, EM-II의 암반 손상영역권은 13.67m 그리고 EM-III의 암반 손상영역권은 12.22m 이내에 발생하게 될 것으로 예측 할 수 있다.

(4) 지금까지 본 연구에서 지하채굴공동에서 굴착방법에 따른 발파진동의 특성에 관한 연구를 하였다. 그 결과 발파진동식에 의한 노모그램 분석과 암반손상권 분석에서 굴착순서별 발파진동의 특성에 큰 차이는 나타나지 않았으나 EM-III와 같은 단일 발파하여 굴착할 때가 가장 안정되게 분석되었다. 앞으로는 채굴광석 종류에 따른 다수 갱도의 굴착시 발파진동의 특성에 관한 연구도 이루어져야 할 것이고, 굴착방법과 발파진동의 관계를 명확히 규명해야 할 것으로 사료된다.

### 참고문헌

1. 선우춘, 정용복, 전양수, 2005, 광주배열과 굴착순서에 따른 지하채광장의 안정성에 대한 수치해석적 연구, KIGMA Bulletin, Vol. 9, No. 3, pp. 47-59.
2. OO광업개발(주), 2005, OO석회석광업소 현황, pp. 1-2.
3. OO광업개발(주), 발파 Pattern도.
4. 장수호 등, 2000, 발파에 의한 터널 주변 암반의 손상영역 평가에 관한 연구, 한국지반공학회논문집, Vol. 16, pp. 129-140.