

## 지하채굴공동에서 굴착방법에 따른 발파진동의 특성에 관한 연구

강추원<sup>1)\*</sup>, 류복현<sup>2)</sup>

### A Study on the Characteristics of Blasting Vibration from Different Excavation Methods in Underground Mine

Choo-Won Kang and Pog-Hyun Ryu

**Abstract** : Recently, most of limestone quarries have been not mined by open-pit mining but by underground excavation to reduce environmental pollution. As a result, the size of underground galleries became bigger to maintain mass-production close to open-pit mining. However, the scale of pillars and galleries as well as the excavation methods may induce a few adverse problems for the stability of a mined gallery. In this study, the nomogram analysis and the prediction of rock damage zone induced by blasting were carried out. The testing conditions include concurrent blasting of two adjacent galleries, concurrent blasting of a transport drift and a inclined shaft, sequential blasting of two galleries, and separate blasting for each gallery. For each testing condition, blast vibration velocity was measured and analyzed. From the prediction formulas for blast vibration velocity derived in this study, the maximum depth of rock damage zone induced by blasting were also predicted.

**Key words** : excavation method, blasting vibration, nomogram analysis, disturbed rock zone

**초 록** : 최근 대부분의 석회석 광산은 환경문제 등으로 인하여 노천채광에서 지하채굴로 전환되었다. 그 결과 노천채광과 같은 생산성을 유지하기 위해 갱도가 대형화 되고 있다. 이에 따라 갱도 및 광주의 규모 그리고 굴착방법 등에서 많은 문제가 발생하고 있다. 본 연구는 두 갱도의 동시 발파 혹은 단일갱도 내에서 좌우반갱도와 사갱을 동시 발파, 두 갱도를 다단 발파 그리고 각각의 갱도를 단독 발파하여 굴착했을 때의 발파진동을 계측하여 각각의 굴착방법에 따라 발파진동식을 산출하여 노모그램 분석과 암반손상권 분석을 실시하였다.

**핵심어** : 굴착방법, 발파진동, 노모그램 분석, 암반손상권

## 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 굴착방법 등에서 많은 문제가 발생하고 있다. 또한 대부분 채광갱도와 광주 크기의 설계는 경험적으로 결정하고 있는 상황이다. 이러한 경험적인 방법

으로 채굴을 수행할 경우 정확한 암반의 특성과약 없이 결정된 갱도는 광주의 안정성을 보장하기 어려운 상황이다(선우춘 외, 2005).

채광을 위한 발파작업시 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 반영하므로써 안정적인 갱도와 광주설계를 수행하여 안전한 채광작업과 효율적인 광산개발과 채광실수율을 증가시키기는 것이 중요하다. 또한 광주의 2차적 채굴을 포기하여 영구히 남겨두는 영구광주법을 채택한 채광장이라면 채수율을 크게 할 필요가 있어 설계된 광주의 크기를 최소로 제한하고 채굴폭을 증가시켜 광산실수율을 더욱 향

1) 조선대학교 자원공학과 교수

2) 조선대학교 자원공학과 박사과정

\* Corresponding author : cwkang@chosun.ac.kr

접수일 : 2006년 5월 30일

게재승인일 : 2006년 6월 16일

상시키는 것이 중요하다. 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 채굴단면 주변 암반의 손상상태를 측정하여 평가할 필요가 있다.

이에 본 연구는 연구대상 현장인 석회석 광산에서 굴착방법별로 발파진동을 계측하여 각각의 발파진동식을 산출하여 노모그램 분석과 암반손상권 분석을 실시하여 지하채굴공동에서 굴착방법에 따른 발파진동의 특성을 규명하고자 함에 있다.

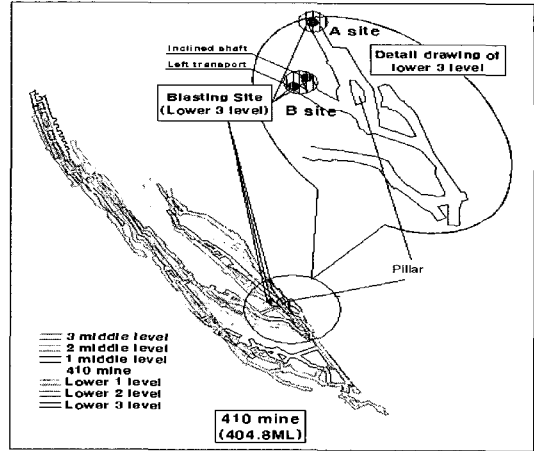


Fig. 1. Mine map of study area.

## 2. 연구지역의 지형

본 연구지역은 충북 제천시 두학동 일대에 속하는 석회석 광산으로써 광채 양상은 가창산 향사, 두학동 복향사 및 기동리 향사 구조로 대분되며 현재 가창산 향사 구역에 Fig. 1과 같이 410갱을 개설하여 1·2·3 중단과 하1·2·3단에서 채광중이다 (OO광업개발, 2005).

하3단의 발파갱도로는 12시 방향의 채석갱도(A 갱도)와 9시 방향의 채석갱도(B갱도 : 좌운반 갱도와 사갱)가 있다. 두 갱도의 최초 이격거리는 137m였으나 굴착 후 230m까지 이격거리가 늘어났다.

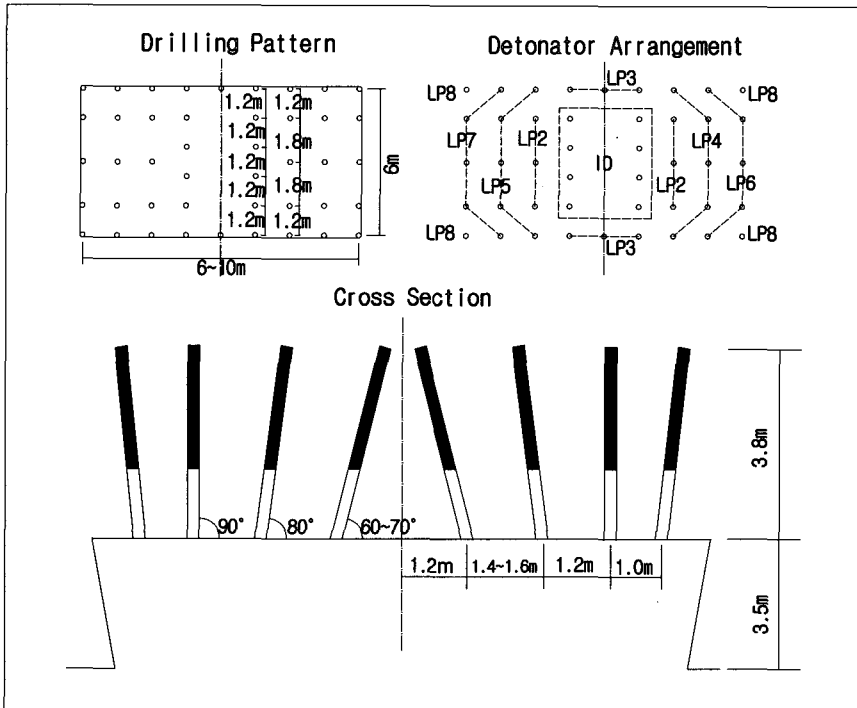


Fig. 2. Blasting pattern in study area.

### 3. 발파패턴 및 굴착방법

본 연구지역인 석회석 광산의 410갱 하3단의 A갱도와 B갱도는 Fig. 2와 같이 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 채광회수율을 높이기 위한 V-CUT방식을 채택하고, 심발각도는 60~70°, 천공장은 3.8m, 굴진장은 3.5m이다. 공당 장약량은 전 폭약 New Emulite 150( $\phi 25$ ) 1개(0.1kg)과 ANFO 3.00~3.33kg/hole을 사용한다. 그리고 ANFO CHARGER로 화약을 장전 발파를 한다(OO광업개발, 2002).

굴착방법으로는 본 현장이 두 갱도 이상의 갱도를 발파할 때 일반적으로 사용하는 동시발파(A갱도와 B갱도 혹은 B갱도 내에서 좌우반 갱도와 사갱 : EM-I)하는 방법, 두 갱도를 차례로 단단식 발파(A갱도와 B갱도 : EM-II)하는 방법, 그리고 두 갱도를 각각 단일 발파(A갱도와 B갱도 : EM-III)하는 방법이 있다.

### 4. 계측방법 및 굴착방법별 발파진동에측식

#### 4.1 계측방법

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

본 연구지역에서 굴착방법별 획득한 데이터 개수는 EM-I의 경우 총 21개, EM-II에서는 총 12개 그리고 EM-III에 대해서는 총 40개를 획득하였다.

#### 4.2 발파진동식의 예측

발파진동의 전파특성을 이론적으로 파악하려는 여러 학자들에 의해서 발파현상에 관련된 변수의 차원해석과 발파진동의 측정 경험을 토대로 발파진동식을 제안하고 있으며, 현재 국내외로 가장 많이 적용하고 있는 경험식은 다음과 같다.

$$V = K \left( \frac{D}{W^b} \right)^n = K(SD)^n \quad (1)$$

여기서,  $V$ : 진동속도(cm/sec)  
 $W$ : 지발당 최대 장약량(kg)  
 $D$ : 폭원으로부터 측정 지점까지의 거리(m)  
 $K$ : 자유면의 상태, 폭약의 종류, 압실 등에 따른 상수  
 $n$ : 감쇠지수  
 $b$ : 1/2 또는 1/3

식 (1)에서 거리와 지발당 장약량의 관계로부터  $D/W^b$ 를 환산거리(scaled Distance,  $SD$ )라고 하며,  $b$ 의 값이 1/2이면 자승근 환산거리(square root scaled distance), 1/3이면 삼승근 환산거리(cube root scaled distance)라고 한다. 일반적으로 근거리에서는 삼승근 환산거리가, 그리고 원거리에서는 자승근 환산거리가 잘 맞는 것으로 알려져 있다.

본 연구에서는 측정과의 거리 및 작업조건을 고려하여 자승근과 삼승근 환산거리를 이용하여 PVS(peak vector sum)와 환산거리(scaled distance)와의 관계를 나타내는 노모그램을 log-log 좌표 상에 나타내었다. 발파진동속도는 지발당 최대장약량과 폭원으로부터 거리를 변수로 하는 환산거리의 함수로 표시될 수 있는데, 그 관계식은 식 (2)와 같다. 이 식에서 진동속도와 환산거리는 비선형적 관계이나 양변에 로그를 취하면 다음과 같은 선형의 식으로 변환할 수 있다.

$$\log V = \log K + n \log(SD) \quad (2)$$

#### 4.3 굴착방법별 발파진동에측식

EM-I에서 EM-III의 Table 1과 같은 발파조건에서 측정된 발파진동속도로부터 얻어진 발파진동 예측식은 다음 식 (3)에서 식 (8)과 같다. 여기서 식 (3), (5) 및 (7)은 자승근의 95%를 포함하는 예측식이며, 식 (4), (6) 및 (8)은 삼승근의 95%를 포함하는 예측식이다. 각각의 굴착방법별 최대진동속도와 환산거리의 log-log 그래프는 Fig. 3, 4 및 5와 같다.

Table 1. Blasting condition

EM	PPV (cm/sec)	distance (m)	charge per delay (kg)
I	0.483 ~ 8.59	18 ~ 152	27.4 ~ 34.2
II	0.435 ~ 9.47	22 ~ 163	27.4
III	0.260 ~ 9.47	28 ~ 275	27.4 ~ 34.2

자승근 95% 신뢰도  $V = 196.12 \left( \frac{D}{\sqrt{W}} \right)^{-1.53} \quad r^2 = 0.92 \quad (3)$

삼승근 95% 신뢰도  $V = 433.94 \left( \frac{D}{\sqrt[3]{W}} \right)^{-1.53} \quad r^2 = 0.93 \quad (4)$

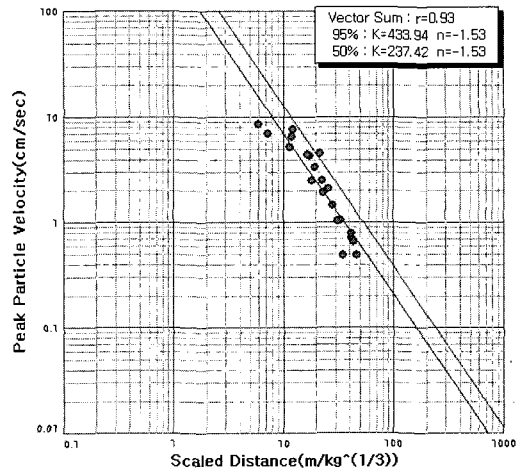
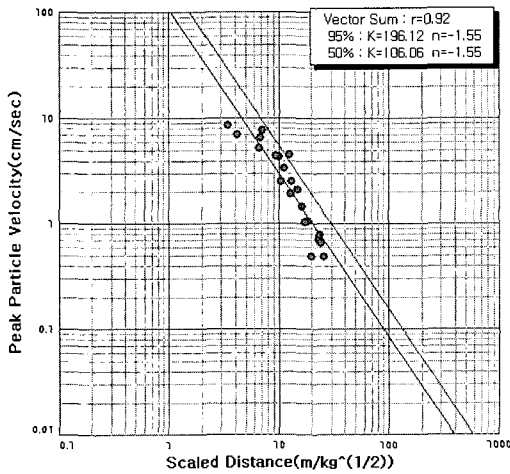


Fig. 3. Relationship between peak particle velocity and scaled distance (EM-I).

자승근 95% 신뢰도  $V = 192.30 \left( \frac{D}{\sqrt{W}} \right)^{-1.47} \quad r^2 = 0.95 \quad (5)$

삼승근 95% 신뢰도  $V = 432.49 \left( \frac{D}{\sqrt[3]{W}} \right)^{-1.47} \quad r^2 = 0.95 \quad (6)$

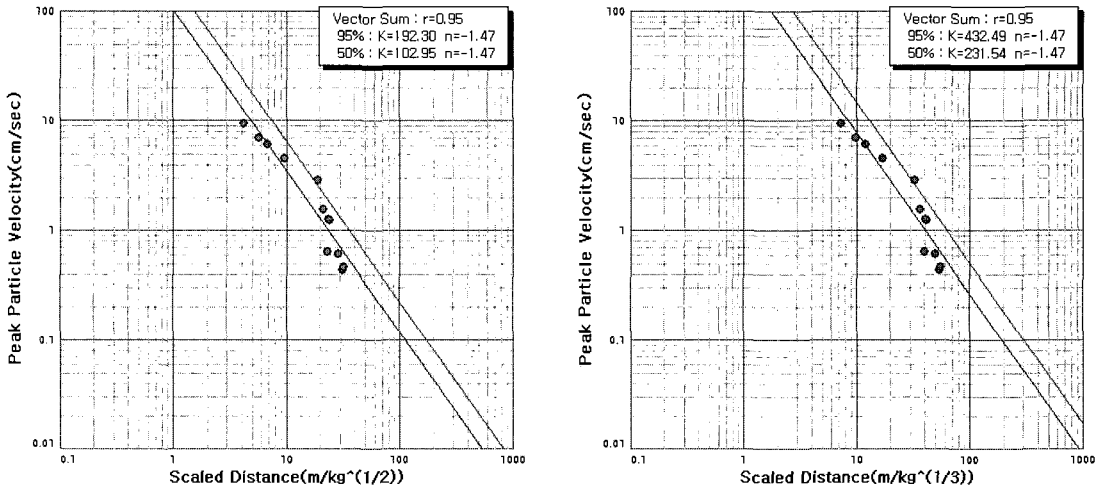


Fig. 4. Relationship between peak particle velocity and scaled distance (EM-II).

차승근 95% 신뢰도  $V = 159.70 \left( \frac{D}{\sqrt{W}} \right)^{-1.51} \quad r^2 = 0.95 \quad (7)$

삼승근 95% 신뢰도  $V = 372.75 \left( \frac{D}{\sqrt[3]{W}} \right)^{-1.52} \quad r^2 = 0.95 \quad (8)$

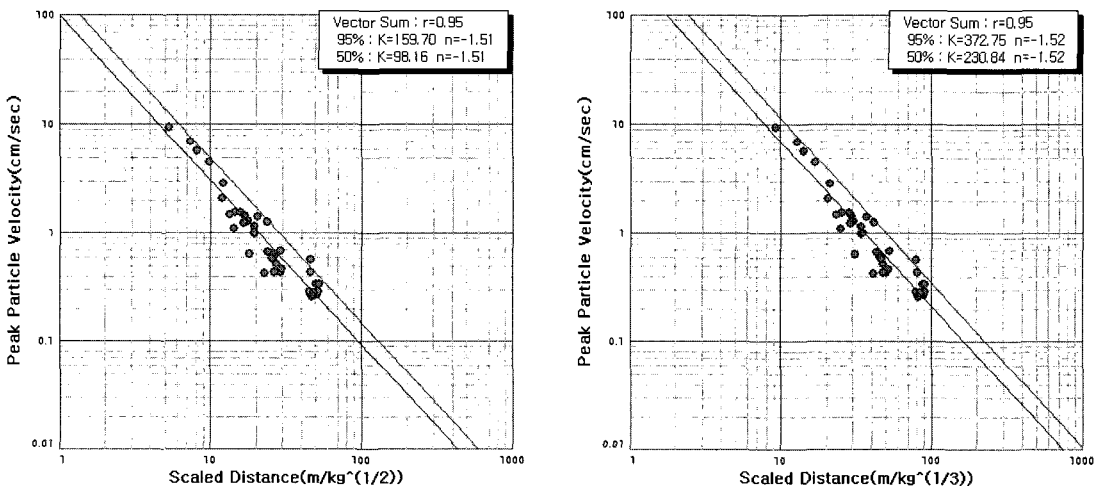


Fig. 5. Relationship between peak particle velocity and scaled distance (EM-III).

#### 4.4 노모그램을 이용한 결과분석

Fig. 6은 EM-I, EM-II 및 EM-III 경우에서 차승근과 삼승근의 PVS와 환산거리의 관계를 나타

낸 것이다. 이 그래프 모두 A경도 혹은 B경도를 각각 단독 발파할 때의 굴착방법인 EM-III가 동일한 환산거리에서의 PVS가 가장 낮게 나타났다.

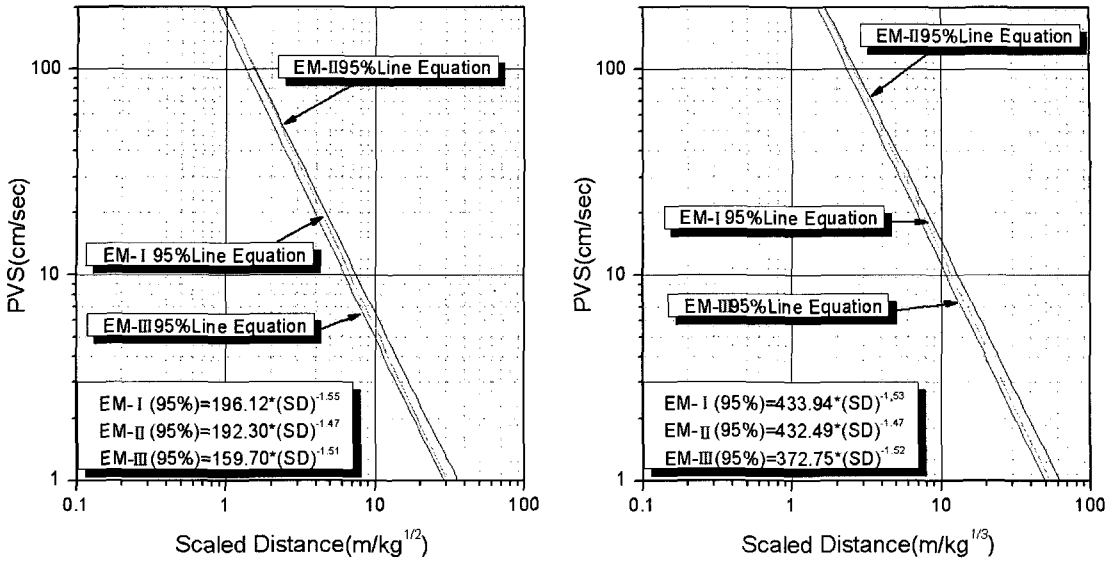


Fig. 6. Relationship between peak vector sum and scaled distance for EM- I , EM-II and EM-III.

### 5. 굴착방법별 암반손상권 분석

#### 5.1 개요

굴착에 의해 영향을 받는 영역인 암반손상·교란 영역(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. 일반적으로 발파공 부근의 발파진동을 직접 측정하기 어렵기 때문에 대부분의 경우 원거리

진동측정을 통하여 근거리의 진동을 추정하는 모델을 적용한다.

$$V_d = \frac{T_s \times V_p}{E} \tag{9}$$

여기서,  $V_d$ =임계진동속도,  $T_s$ =일축압축강도,  $V_p$ =탄성과 속도,  $E$ =탄성계수이다.

손상이 발생할 때의 임계진동속도와 동일한 진동속도가 발생하는 지점까지의 거리를 암반손상권의 범위로 정의할 수 있다(장수호 외, 2000).

본 연구에서는 TunDesign Ver 3.0을 사용하여 암반손상권 분석을 실시하였다.

#### 5.2 암반손상권 분석결과

본 계산에 적용된 최대발파진동속도식은 앞서 발파진동속도 측정결과에서 도출된 삼승근 발파진동속도에측식인 식 (4), (6) 및 (8)이다.

임계진동속도는 Table 2의 변수로 식 (9)를 이용하여 구하였다.

Fig. 7과 같이 손상이 발생할 때의 임계진동속도 ( $V_d$ )는 143.95cm/sec 이고 EM- I 의 암반 손상영

Table 2. Physical properties of the limestone

$T_s$ (kg/cm <sup>2</sup> )	$V_p$ (m/sec)	$E$ (105kg/cm <sup>2</sup> )
104	5,163	3.73

역권은 2.63m, EM-II의 암반 손상역역권은 2.70m, EM-III의 암반 손상역역권은 2.38m 이내에 발생하게 될 것으로 예측 할 수 있다.

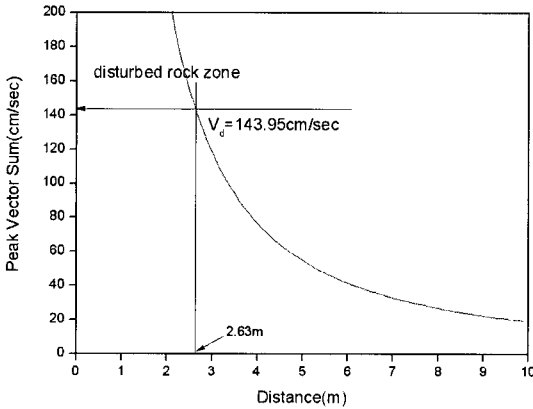


Fig. 7. Prediction of disturbed rock zone (EM-I).

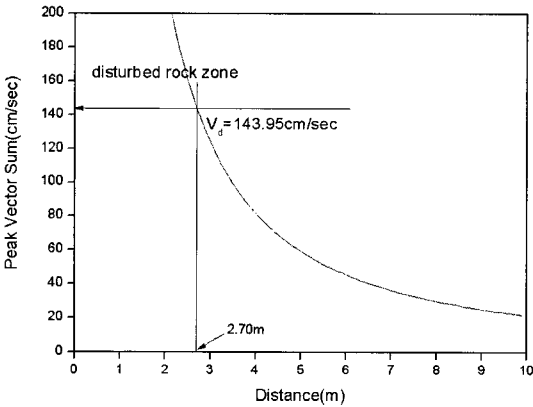


Fig. 8. Prediction of disturbed rock zone (EM-II).

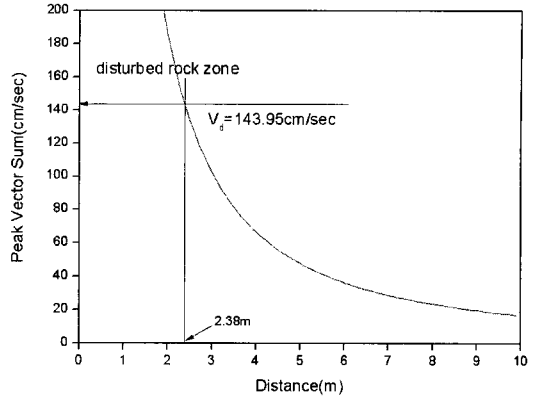


Fig. 9. Prediction of disturbed rock zone (EM-III).

리에서의 PVS가 가장 낮게 나타난 것으로 보아 EM-III의 굴착방법이 갱도와 광주에 가장 안전한 굴착방법으로 판단된다.

(2) 본 연구에서 굴착순서별 암반손상권 분석 결과 손상이 발생할 때의 임계진동속도( $V_d$ )는 143.95cm/sec 이고 EM-I의 암반 손상역역권은 2.63m, EM-II의 암반 손상역역권은 2.70m 그리고 EM-III의 암반 손상역역권은 2.38m 이내에 발생하게 될 것으로 예측 할 수 있다.

(3) 본 연구결과 발파진동예측식에 의한 노모그램 분석과 암반손상권 분석에서 굴착순서별 발파진동의 특성에 큰 차이는 나타나지 않았으나 EM-III와 같은 두 갱도를 각각 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.

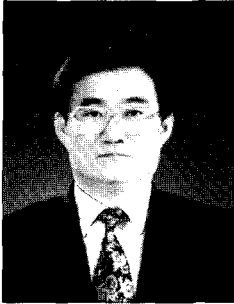
## 6. 결 론

본 연구는 지하채굴공동에서 굴착방법에 따른 발파진동의 특성에 관한 연구로써 각 굴착방법별로 계측된 발파진동데이터를 바탕으로 발파진동식을 산출하고 그에 따라 노모그램분석과 암반손상권 분석을 실시하였다. 그리하여 지하채굴공동의 굴착방법에 따른 발파진동의 특성을 파악하여 비교 분석한 결론은 다음과 같다.

(1) 본 연구에서 노모그램을 이용한 분석결과 자승근과 삼승근 모두 A갱도와 B갱도를 각각 단일 발파하여 굴착했을 경우인 EM-III가 동일한 환산거

## 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), 2002, 발파 Pattern도.
4. 장수호, 신일재, 최용근, 이정인, 2000, 발파에 의한 터널 주변 암반의 손상영역 평가에 관한 연구, 한국지반공학학회논문집, Vol. 16, No.5, pp. 129-140.

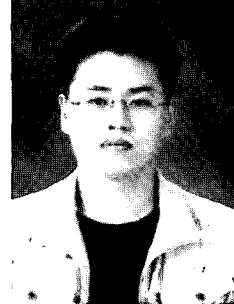


강 추 원

1973년 조선대학교 공과대학 자원공학과 공학사  
1981년 조선대학교 대학원 자원공학과 공학석사  
1999년 강원대학교 대학원 자원공학과 공학박사

현재 조선대학교 자원공학과 교수  
(E-mail : cwkang@mail.chosun.ac.kr)

---



류 복 현

2004년 조선대학교 공과대학 자원공학과 공학사  
2006년 조선대학교 대학원 자원공학과 공학석사

현재 조선대학교 대학원 자원공학과 박사과정  
(E-mail : pogryu@hanmail.net)

---