

# 발파진동이 사면에 미치는 영향과 안전설계에 관한 연구

## A Study on the Safe Blast Design to Increase Slope Stability

안 명석<sup>1)</sup>, 류 창하<sup>2)</sup>, 박 종남<sup>3)</sup>, 권 중암<sup>4)</sup>

Myung-Seog Ahn, Chang-Ha Ryu, Jong-Nam Park, Jung-Am Kwun

<sup>1)</sup>동서대학교 응용공학부, <sup>2)</sup>한국지질자원연구원

<sup>3)</sup>동아대학교 자원공학과, <sup>4)</sup>쌍용건설(주)

### 초 록

본 논문에서는 암굴착시 발파에 의한 암반사면의 균열방지 및 사면안정 재고를 위하여 대구-포항간 고속도로 건설현장에서 시험발파를 실시하고 그 결과를 분석하여 천공깊이별 안전 발파패턴을 제시하였다. 또한 현지 탄성과 속도를 측정하여 발파에 의해 암반에 미치는 균열 상태를 조사한 결과 탄성과속도의 감소가 40 ~ 53%로서 암반 중에 균열을 발생시킨 것으로 나타났다. 발파진동 계측결과를 분석하여 암반에 균열을 일으킬 수 있는 진동속도 기준을 설정하여 균열권 범위를 추정하였으며 사면의 기하학적 형상을 고려하여 손상대를 최소화 할 수 있는 적정 안전설계 패턴을 제시하였다.

**핵심용어** : 사면안정, 발파진동, 탄성과속도, 안전설계

### 1. 서 론

발파작업에 수반되는 소음과 진동은 환경공해 측면과 함께 구조물의 안정성 영향 측면에서 고려해야 할 중요한 요소이다.<sup>1)2)</sup> 특히 충격성 진동인 발파진동은 기존 구조물의 안정성을 위해 정밀하게 측정되고 분석되어야 한다. 산악지를 통과하는 도로 변에 형성된 암반 사면들을 관찰해 보면 사면 아래 돌덩이가 쌓여 있기도 하고, 또는 때때로 낙석이나 붕락으로 인하여 교통장애 및 사고의 원인이 되고 있는 것을 볼 수 있다. 불안정한 사면은 사면의 경사나 절

리의 발달 상태가 주요 원인이 되지만 또 다른 요인으로서 도로 굴착시 발파로 인하여 암절취 사면이 손상을 받는 것이 1차적인 원인이 될 수 있음을 간과해서는 안될 것이다.

본 논문에서는 암반 굴착시 발생하는 발파진동의 수준과 현지 탄성과속도의 계측을 통하여 발파에 의한 암반 영향 평가 및 사면에 손상을 미칠 수 있는 범위를 추정하고, 사면의 안정성 재고와 장기간 유지·보존을 위한 품질관리 및 설계자료로 활용하고자 하였다.<sup>3)</sup> 대상 현장은 대구-포항간 고속도로 4공구 공사현장으로 암절취 작업을 위한 발파를 수행함에 있어서 발

파진동이 사면에 미치는 영향을 최소화하기 위한 미진동 제어발파를 실시하고 그 계측 결과를 분석하였으며, 암반의 이완 정도를 평가하고 암반사면의 균열방지 및 사면안정 제고를 위한 발파설계안을 제시하였다.

## 2. 발파에 의한 암반의 균열권 형성 이론 및 안전기준

### 2.1 누두공 이론과 표준발파

폭약의 위력과 암석에 대한 저항성을 파악하고 적절한 장약량 산정을 위한 자료를 얻음 목적으로 누두공 시험발파가 실시된다. 이 시험은 주위 암반이 발파에 의한 영향을 받도록 적당한 깊이로 천공을 하고 폭약을 장전하여 폭발하면, 그 결과로 원뿔 형상의 누두공(crater)이 생성되는데 이 형상을 관찰하여 대상 암반에 적용할 폭약의 적정 장약량을 평가하게 된다.

누두공을 도식적으로 나타내면 그림 1의 (a)와 같다. 누두공의 평가를 위하여 누두공의 반경을 R, 장약의 중심에서 자유면까지의 최단거리를 최소저항선 W라 하고 누두공의 형상은 식 (1)과 같이 R과 W의 비인 누두지수 n으로 표시한다. 그림 1의 (b)와 같이 누두공 반경과 최소저항선이 같은 경우를 표준장약이라고 하며 n이 1보다 클 경우를 과장약, 작을 경우를 약장약이라고 한다.

$$n = \frac{R}{W} \quad (1)$$

시험발파로 형성된 누두공을 평가하여 장약량, L을 산정하는 경험적 방법이 제시되어 있는데 이는 식 (2)와 같다. 식에서 f(n)은 누두지수의 함수로서 목적하는 누두공을 얻기 위한 장약량 수정에 사용되며, C는 발파계수로서 암반의 특성, 폭약의 종류, 전색방법 등에 따라 결정된다.

$$L = f(n) \cdot C \cdot W^3 \quad (2)$$

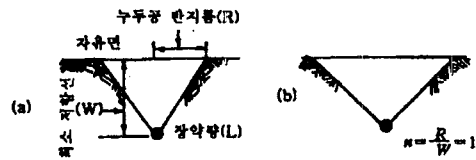


그림 1. 누두공 이론 설명도

### 2.2 폭약의 위력권 이론

폭약이 천공된 발파공에서 뇌관의 기폭력에 의하여 폭발되면 순간적으로 다량의 가스와 고열이 발생하고 폭발파와 함께 고열로 인하여 가스가 팽창하면서 주변에 엄청난 크기의 충격압이 작용하게 된다. 폭약의 폭발로 인하여 주위 암반에는 압축, 확대, 분쇄, 파괴, 균열권이 형성되며 암반을 파괴시키지 못할 정도로 에너지가 저하되면 응력파의 형태로만 전달된다. 그림 2에서 o는 장약실, a는 압축확대권 b는 분쇄권, c는 파쇄권, d는 균열권으로 파쇄대를 구분할 수 있으며 이 부분을 총칭하여 폭력의 위력권이라 하고 e는 단순히 응력파가 전달되는 부분이다.

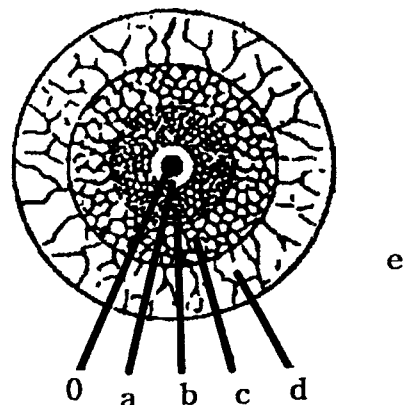


그림 2. 장약공 주위의 폭약 위력권

일반적으로 법면에 미치는 암반의 이완 범위는 d와 e의 경계점에 해당한다고 할 수 있다. 즉 암반에 균열 등의 영향을 미치는 범위는 단순 진동 전달영역 e의 경계점 이내로 판단할 수 있다.

### 2.3 사면 보호를 위한 진동안전기준 설정

발파진동에 대한 허용기준의 척도로서 환경공학 측면에서는 인체 감응 특성을 고려하여 주파수 대역에 따라 보정을 한 진동레벨을 평가척도로 사용하고 있지만 구조물의 영향을 평가하는 데는 적합하지 못하다. 미국, 캐나다, 유럽 등에서 수행되었던 많은 연구결과를 종합하면, 구조물이 받는 피해의 정도는 진동속도를 이용하여 평가하는 것이 가장 타당한 것으로 알려져 있다.<sup>7,9)</sup>

Hendron(1977)이 발파로 인한 무복공 터널의 손상대를 관찰한 결과에 의하면 터널암반에서 간헐적으로 낙석이 발생하는 진동의 최소 수준은 약 46 cm/sec로 나타났다. Langefors는 암반에 균열이 발생하는 수준을 기초 암반에서의 진동속도치 v와 탄성파의 전파속도 c의 비로서 표현할 때 10 이상으로 제안하고 있으며, c를 3,000 m/sec 정도로 본다면 균열발생 수준은 30 cm/sec가 된다. 이론적으로 탄성파 속도에 의해 매질 내에서 발생하는 응력  $\sigma$ 를 매질의 밀도  $\rho$ 와 c, v와의 관계로 표현하면 식 (3)과 같으며, 암반의 강도수준을 넘지 않는 v의 값을 계산하면 이와 유사한 수준으로 추정된다.

$$\sigma = \rho cv \quad (3)$$

본 연구에서는 안전 설계를 위하여 이보다 다소 보수적인 수준으로서 Dupont사가 제안하고 있는 표 1의 13.7 cm/sec의 진동수준을 저색·회색세일 암반인 본 연구 대상지역에 적합한 법면 보호를 위한 진동안전기준으로 설정하였다.<sup>5)</sup>

표 1. Dupont사가 제안한 구조물의 피해정도

최대진동속도 (cm/sec)	피해정도
30.5	터널암반의 낙석유발
19.3	회벽에 커다란 피해
13.7	회벽이 갈라지기 시작
7.6	밀폐지역발파의 규제치
5.0	미광무국이 추천한 안전한계

### 2.4 진동예측방법

발파진동의 전파특성을 결정짓는 인자들은 전파매질이 되는 대상 암반의 역학적, 구조적 특성과 폭약의 특성 및 발파조건으로 대별할 수 있다. 발파진동의 크기는 주요 인자들을 변수로 하여 전파식을 도출하여 예측할 수 있지만 여러 가지 형태의 전파식중 가장 실용적이고 국내·외에서 가장 많이 적용하고 있는 식은, 직접적인 요인이 되는 지발당 최대 장약량과 폭원으로부터의 거리를 주요 변수로 하는 식 (4)와 같은 환산거리 식으로 표시할 수 있다.<sup>1,2)</sup>

$$V = K \left( \frac{D}{W^b} \right)^{-n} \quad (4)$$

여기서, V : 진동속도 (cm/sec)  
 D : 폭원으로부터의 거리 (m)  
 W : 지발당 장약량 (kg)  
 K : 자유면의 상태, 폭약의 종류, 암질 등에 따른 상수  
 n, b : 감쇠지수 및 장약지수

장약지수 b는 1/2 또는 1/3이 사용되며 본 연구에서는 계측 자료의 처리결과 적합도가 높은 식을 적용하였다.

### 3. 시험발파 및 결과

대상 지역의 암질은 저색세일 및 회색세일의 호층구조로 이루어져 있으며, Deere와 Miller의 암석분류법에 의하면 일축압축강도 670~1100 kg/cm<sup>2</sup> 정도의 보통암에 해당하는 암반이다.<sup>2)</sup>

시험발파는 작업대상 지역을 빗트 직경 75 mm의 유압드릴을 사용하여 1~3회 발파는 천공장 3.0 m로 15공, 4~9회 발파는 천공장 9.0 m로 30공을 천공한 후, 전기식 뇌관을 사용하여 각 5공씩 총 9회에 걸쳐 지발발파 하였으며, 이때 발생하는 소음 및 진동을 공사현장 내 STA.8+180 ~ STA.8+140 지점에서 발파진동 전용계측기인 Instancel사의 DS-677과 Thomas Instruments사의 VMS-200S 및 VMS-100S로 측정하였다.

발파에 의한 암반의 균열 정도는 발파 전 및 발파 후의 현지 탄성파속도를 측정한 후 상대적인 비교를 통하여 평가하였다. 탄성파속도의 측정은 Hand Viewer를 사용하였으며, 본 장비는 3개의 채널을 가지고 있고 해머에는 트리거가 장착되어 있다.

#### 3.1 시험발파 방법 및 발파진동 측정결과

시험발파의 제원은 표 2와 같이 미진동 소발파 공법으로서 천공경 75 mm, 천공장 3.0 m, 최소저항선 및 간격 1.5~2.0 m 제원으로 시행하였으며, 일반발파공법은 천공경 75 mm, 천공장 9.0 m, 최소저항선 및 간격 2.0 ~ 3.0 m 제원으로 시행하였다.

표 2의 제원에 따라 실시한 각 시험발파 결과를 종합하면 표 3 및 표 4와 같다.

표 2. 시험발파의 제원

공법구분 제원	미진동 소발파 (TYPE-I)	일반발파 (TYPE-II,III)
천공경	Ø 75 mm	Ø 75 mm
천공장	3.0 m	9.0 m
최소저항선	1.5 m	2.0 m
천공간격	2.0 m	3.0 m
공당장약량	1 kg	15 kg
지발당장약량	1 kg	15 kg
1회발파공수	5공	5공
사용폭약	에멀존폭약 Ø50mm	에멀존폭약 Ø50mm
사용뇌관	MSD 지발전기뇌관	MSD 지발전기뇌관
발파횟수	1~3회	4~9회

#### 3.2 탄성파속도 측정결과

시험발파 실시 전의 암반 상태와 실시 후의 암반 상태를 평가하기 위하여 실시한 현지 탄성파속도 측정 결과는 표 5와 같으며 contour map을 작성한 결과는 그림 3과 같다.

실험 결과 STA.8+180의 3 m 천공지역에서는 발파 전 1226.3 m/sec에서 발파 후 730.4 m/s로 약 495.9 m/s의 현지 탄성파속도의 감소가 나타났다. 이러한 결과는 STA.8+150의 9m 천공지역에서도 동일한 양상을 보이고 있다.

표 3. 시험발파 패턴 TYPE-I의 진동측정 결과표

측정거리 회수	5m		10m		15m		20m	
	진동치 cm/sec	발파음 dB(L)	진동치 cm/sec	발파음 dB(L)	진동치 cm/sec	발파음 dB(A)	진동치 cm/sec	발파음 dB(A)
1회	4.59	130.1	2.42	120.9	1.78	84.8	1.92	88.2
2회	5.79	131.7	2.65	121.2	-	-	2.38	85.4
3회	4.93	135.6	2.83	123.8	-	-	1.93	87.2
평균	5.10	132.5	2.63	122.0	1.78	84.8	2.07	86.9

표 4. 시험발파 패턴 TYPE-II,III의 진동 측정결과표

측정거리 회 수	8m		10m		20m		25m		30m	
	진동치 (kine)	발파음 dB(L)	진동치 (kine)	발파음 dB(L)	진동치 (kine)	발파음 dB(A)	진동치 (kine)	발파음 dB(A)	진동치 (kine)	발파음 dB(A)
1회	8.72	128.9	11.0	124.1	5.451	93.2			4.172	91.8
2회	15.01	132.7	9.11	129.0	4.894	95.0			3.669	90.8
3회	17.32	128.5	8.71	127.1	4.965	93.4			3.556	92.6
4회			9.13	125.2	4.91	92.2	4.485	92.4		
5회					4.842	91.6	3.986	93.0		
6회			6.32	128.4	5.902	91.8	3.283	92.6		
7회			4.43	124.7						
8회			4.85	121.2						
9회			4.81	122.7						
평균	13.68	130.03	9.61	126.73	5.10	93.87	3.92	92.67	3.80	91.73

표 5. 탄성과 측정 결과

위 치	발파 전	발파 후	비 고
STA.8+180 3m 천공지역	1226.3	730.4	40% 감소
STA.8+150 9m 천공지역	1501.1	710.8	53% 감소

#### 4. 결과분석

##### 4.1 진동속도 측정치의 분석결과

시험발파로부터의 진동측정치들을 로그-로그 스케일에 도시하고 회귀분석을 실시하여 지수를 산출하였으며, 식 (5)와 같다, 진동전파식은 그림 4에서와 같이 50% 및 95%직선으로 표시된다.

$$V = 484.015 \left( \frac{D}{W^{1/2}} \right)^{-0.907} \quad (5)$$

식 (5)의 진동전파식을 이용하여 시험발파시 암반에 균열을 일으킬 수 있는 진동속도기준으로 설정한 13.7 cm/sec에 대해 균열권을 산출하면, 천공장 3 m의 경우 암반사면에 미치는 균열권의 범위는 4.0 m이었고, 천공장 6m의 경우 7.3 m 이었으며, 천공장 9m의 경우 9.9 m로 나타났다. 각 조건에 대한 균열 형성 예상도를 도시하면 그림 5와 같다.

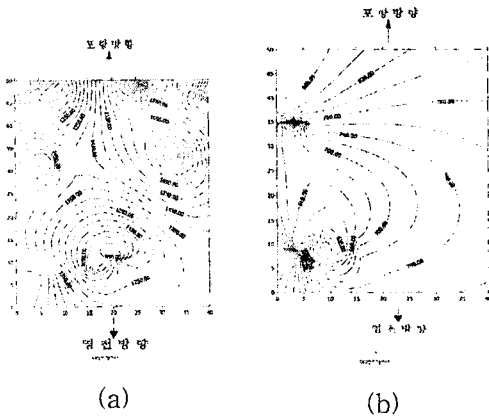


그림 3. 탄성과 속도 측정 Contour Map  
(a) 발파전, (b) 발파후

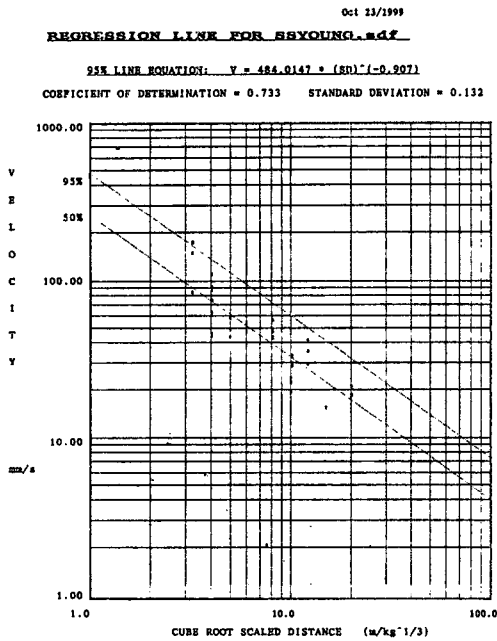


그림 4 환산거리에 대한 최대진동속도치 분석표

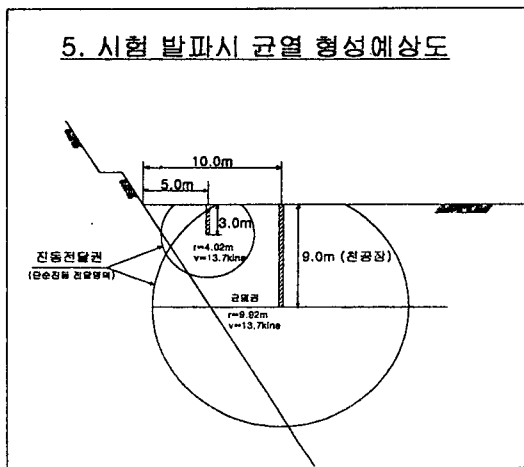


그림 5. 균열 형성 예상도

#### 4.2 탄성파속도 측정치의 분석결과

표 5에서의 탄성파속도 측정결과 나타난 발파 후의 탄성파속도 변화는 발파로 인하여 암반에 변화가 발생하였음을 보여준다. 탄성파속도를 이용하여 암반을 분류할 경우, 발파 전의

암반은 경암에 해당하며 발파 후의 수치는 연암 ~ 풍화토로 분류되는 속도에 해당한다.

이와 같이 탄성파속도가 발파전보다 40~53%나 감소한 사실은 발파작업으로 인하여 충격진동의 영향을 받아 암반 중에 균열이 추가로 발생하였거나 기존의 균열이 확대되는 등의 변화가 있는 것으로 판단된다. 따라서 충격진동으로 인해 균열이 추가로 발생하거나 기존의 균열이 확대된 균열지역은 암반사면에 영향을 받지 않은 경우와 비교할 때 안정성이 상당히 감소할 수 있음을 보여주고 있다. 향후 연구시에는 이러한 기존균열의 확대 혹은 추가 발생한 균열상태를 더욱 정밀히 조사하기 위해서 절취후 사면의 비저항, 비파괴조사와 육안조사 등 조사방법의 개발 및 적용을 추가해야 할 필요가 있는 것으로 사료된다.

#### 4.3 발파 패턴 추천안

1 : 0.5의 사면 경사각을 가지는 대상 현장의 경우 균열형성 예상도를 작성하였을 때 기본 설계에 따른 이격거리 5 m로는 균열형성이 예상되므로 향후 발파패턴 설계 시에는 3 m 천공장의 경우 이격거리는 6 m 이상으로 하여 기존 5m 이격거리 보다 1m를 더 이격시킬 때 균열권역을 벗어나므로 더욱 안전할 것이며, 6 m 천공장의 경우 이격거리는 11.5 m 이상이 되어야 하고, 9 m 천공장의 경우 이격거리는 15.5 m 이상이 되어야 할 것으로 계산되었다.

향후 표준사면 경사각 1 : 0.5 이외에도 사면 구배에 따른 각 경사각별 모델 실험 및 이격거리 연구가 추가로 필요한 것으로 판단된다.

본 실험결과 시험발파시의 균열형성 예상도를 참고하여 안전 발파를 위한 패턴도를 제시하면 그림 6과 같다.

제시된 패턴은 도로개설을 위한 암굴착을 위한 발파 작업시 제거되지 않고 사면 구조물로 남아 있는 암반에 손상대를 최대한 억제할 수

있는 방법이며 사면의 최종 단면이 되는 법면의 형성을 위해서는 프리스플리팅 공법과 같은 제어발파 방법이나 브레이커 절취공법 등을 보완 적용되는 것이 바람직하다. 국내의 경우 사면 형성을 위한 제어발파 품이 산정되어 있지 않고 손상 받은 법면을 정리하는 품만 인정하고 있어 사면 안정성 재고에 불리한 면으로 작용하고 있다. 그러나 최종 단면 처리에 있어서 어떠한 공법이 적용되든지 암절취를 위한 발파 작업으로부터 사면 구조물에의 손상대 발생 억제를 위해서는 제시된 패턴과 같은 발파방법이 적용될 필요가 있다.

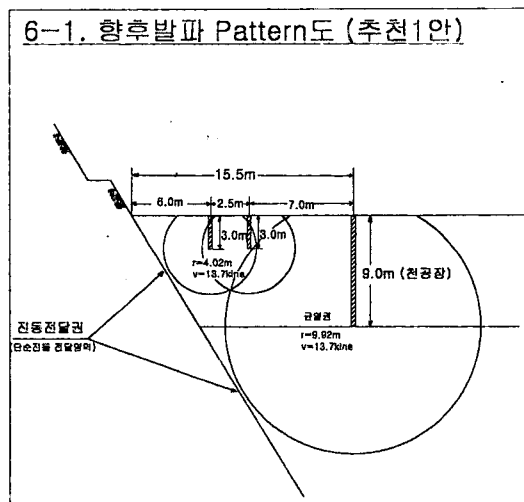


그림 6. 손상대 억제를 위한 안전발파패턴도

## 5. 결 론

암굴착시 발파에 의한 암반사면의 균열방지 및 사면안정성 재고를 위하여 고속도로 건설현장에서 시험발파를 실시하고 그 결과를 분석하여 적정 발파패턴을 제시하였다. 주요 결과를 요약하면 다음과 같다.

1) 연구대상 지역에서 측정된 발파진동 계측 자료를 회귀 분석한 결과 진동추정식은  $V =$

$484.015(SD)-0.907$  이었으며, 이 때 시행한 기본 발파 방법은 법면에 영향을 미칠 수 있는 것으로 확인되었다.

2) 현지 탄성과속도를 측정하여 충격진동으로 인해 암반에 미치는 균열상태를 조사한 결과, 발파 전·후 탄성과 속도의 감소는 40 ~ 53%로써 암분류상 발파 전 경암으로부터 발파 후 연암 내지 풍화토로 변화될 정도로 암반 중에 균열이 새로이 발생하거나 기존균열이 확대된 것으로 확인 되었다.

3) 암반에 균열을 일으킬 수 있는 진동속도 기준을 13.7 cm/sec로 설정하여 주어진 패턴에 대해 손상대를 평가하였을 때, 천공장 3 m의 경우 균열권의 범위는 4.0 m이었고, 천공장 6 m의 경우 7.3 m 이었으며, 천공장 9 m의 경우 약 9.9 m로 나타났다.

4) 1:0.5의 사면 경사각을 가지는 대상 현장의 경우 균열형성 예상도를 작성하였을 때 현재의 이격거리 5 m로는 암반사면에 균열을 형성할 수 있으므로 사면의 기하학적 형상을 고려하여 손상대를 최소화 할 수 있는 이격거리를 산정하여 안전 발파패턴도를 제시하였다.

향후 본 사면 경사각 외에도 사면 구배에 따른 각 경사각별 모델 실험 및 이격거리 연구가 추가로 필요한 것으로 판단된다.

5) 사면의 최종 단면이 되는 법면의 형성을 위해서는 프리스플리팅 공법과 같은 제어발파 방법이 적용될 수 있도록 국내 품셈의 조정이 필요할 것으로 판단되며, 최종 단면 처리방법과 관계없이 암절취를 위한 발파작업에서는 사면에의 손상대 발생 억제를 위한 방법이 적용될 필요가 있다.

6) 향후 도로개설 공사장에서는 사면 경사각을 고려하여 법면 보호를 위한 발파설계를 하여야 할 것이며, 착공시 시험발파 때에는 필히 발파 진동식을 산출하여 적정한 균열안전거리를 두고 시공에 입할 때 보다 높은 품질관리가 가능할 것이다.

and Damage Produced by Ground Vibration From Surface Mine Blasting, USBM RI 8507, pp. 74

## 참 고 문 헌

1. 류창하 (1992) 암반굴착에 의한 발파진동, 소음 및 비석의 조절, 한국암반공학회지 제2권 제1호, pp. 102-115.
2. 안명석 (2000) 건설현장에서 안전성 향상을 위한 지반진동·소음·비산먼지 측정자료의 분석에 관한 연구 -영남지역의 퇴적암·화성암층에서 발파 및 항타작업을 중심으로- 공학박사 학위논문, 동아대학교 pp.156, 101
3. 천병식·오재응 (1993) 건설기술자를 위한 지반진동의 영향과 대책, 건설연구사 pp.285~290.
4. 배상근·박종남·안명석(1998) 도심지 미진동 제어발파에서 진동분석을 통한 안전발파설계에 관한 연구(I), 대한토목학회 논문집 제 18권 제 III-3호, pp.377~379
5. DuPont (1980), Blasters Handbook, E.I. Dupont, Wilmington, pp. 494
6. Hendron A.J. (1977) Engineering Rock Blasting on Civil Projects, Structural and Geotechnical Mechanics, Prentice-Hall, Inc., pp.242-277.
7. Edwards, A.T. and Northwood, T.D. (1960) Experimental studies of the Effects of Blasting on Structures, The Engineer, pp. 210.
8. Siskind, D.E., Stagg, M.S., Kopp, J.W. & Dowding, C.H., (1980) Structure Response