

# 화성암반에서 터널발파 진동특징의 분석에 관한 사례 연구

## A Case Study on the Vibration Characteristics of Tunnel Blasting in Igneous Rock

윤 성현, 안 명석, 이 광열

Seong-Hyun Yoon, Myung-Seog Ahn, Kwang-Yeol Lee

동서대학교 일반대학원 토목공학과

**ABSTRACT.** Test blasting has been performed with V-cut to investigate the characteristics. Blasting vibrations were measured at two directions, the proceed direction and side direction. Propagation characteristics were determined by regression analysis; square root scaled distance and cube root scaled distance with maximum charge per delay of the blast.

Testing result, The cross point was 62m in the allowable vibration velocity of 3mm/sec and 46m in 5mm/sec. Also, vibration level with measuring point was highest and decayed fastest, adapting to cube root scaled distance, for the proceed direction on ground.

Keywords : Igneous Rock, tunnel blasting, PPV, Regression analysis, Cross point

**초 록.** 터널 발파에 있어서 진동특성을 규명하기 위하여 V-cut 심발패턴으로 시험발파를 수행하고, '터널 진행방향'과 '터널 진행직각방향'의 두 방향에서 발파진동을 계측하였다. 최대지발당 장약량을 기준으로 지반의 진동 전달특성을 확인하기 위하여 자승근 환산거리와 삼승근 환산거리로 회귀분석을 수행한 결과 허용진동속도 3mm/sec에서 교차점은 62m였으며, 5mm/sec에서 교차점은 46m였다. 또한 터널 진행방향에서 측정된 경우가 터널 진행직각 방향에서 측정된 경우보다 진동수준은 크게 나타났으며, 삼승근 환산거리 적용시 감쇠특성이 더욱 우세하였다.

핵심어 : 화성암, 터널발파, PPV, 회귀분석, 교차점

### 1. 서 론

터널굴착은 대부분 화약을 이용한 발파작업으로 수행되는데, TBM 등 기계적 굴착 공법들에 비해 소음·진동 발생 측면에서 불리한 점도 있으나 경제성이 뛰어나 특수한 경우를 제외하고는 토목 및

자원 개발 분야에서 널리 사용되고 있다. 그러나 이러한 발파작업으로 인하여 예상되는 가장 대표적인 문제점으로 발파로 인한 지반진동이 인접구조물에 영향을 미칠 뿐 아니라 각종 민원을 야기하고 있다는 것이다. 그러나 발파 주변 지반의 공학적 진동특성 및 주파수 특성을 파악할 수 있다면

발파진동으로 인한 문제를 해결하는데 많은 효과를 발휘하게 될 것이다.

본 논문에서는 계측위치별 적정 진동식을 추정하기 위하여 자승근 환산거리와 삼승근 환산거리를 회귀분석(Regression analysis)을 통하여 신뢰구간 50%와 95%에서 비교·분석을 실시하였으며, 계측위치의 변화에 따른 주파수 대역의 영향을 확인하기 위하여 주 진동수와 PPV(peak particle velocity) 및 거리를 상호 비교하였다. 또한 계측 위치의 변화에 따른 우세 주파수 대역을 규명하여 적정 진동추정식을 유도하여 본 발파에 적용함으로써 보다 안전하고 경제적인 시공을 하며, 동시에 진동을 제어하여 민원 발생의 소지를 미연에 제거하는데 기여 할 것이다.

## 2. 터널발파 패턴의 특성

터널 발파는 단일 자유면에서 행하여지는 극히 제한된 발파이기 때문에 발파공해인 진동 및 소음을 유발하게 된다. 벤치발파와 달리 터널 발파의 경우는 1자유면인 상태에서 2자유면을 형성시킨 다음 나머지는 벤치발파와 같은 형태로 발파가 진행된다. 이런 1자유면의 발파 과정을 ‘심빼기’라고 하는데 발파의 성공과 실패여부를 결정짓는 아주 중요한 과정이다. 심발이 성공적으로 진행된다면 심발(Cut), 주변공(stoping), 외곽공(liffler), 최외곽공(Contour)의 순으로 발파가 진행된다. 일반적인 터널발파의 패턴은 다음과 같다.

### 2.1 V-Cut 발파패턴

V-Cut은 경사천공의 대표적인 방법으로 적은 에너지로 많은 효과를 낼 수 있다는 장점이 있지만, 정확한 각도의 경사천공이

어렵고, 터널 폭에 의해 굴진장에 제한이 가해진다는 단점이 있다. 굴진장은 보통 터널 너비의 45~50% 정도로 선택하며, 천공오차가 5% 이상이 될 경우 근접공의 장약부분이 너무 가까이 위치하게 되어 순폭의 위험이 있다. 공저 사잇각(bottom angle)은 60°이상으로 하는 것이 에너지 효율면에서 가장 좋다.

### 2.2 Burn-cut 발파패턴

Burn-cut은 심발공의 중앙에 무장약공의 공공을 두고 수 개의 심발공을 평행천공하여 장약공을 자유면으로 발파가 이루어지도록 하여 천공작업이 용이하며 굴진장이 증대되는 장점이 있지만, 심발공의 공간격이 가까워 동일 천공장의 경우 번 컷트에 의한 신 자유면은 경사공 심발에 비해 적고, 천공장이 짧을 때는 경사공 심발에 비해 발파효과가 저하되는 단점이 있다. 그리고 현재 Jumbo Drill 천공장소에서 널리 시행하는 방법으로  $\phi 102\text{mm}$  대구경의 무장약공을 1~3공을 천공하고 무장약공을 중심으로 장약공을 평행하게 천공하여 일정한 시차로 발파시키면서 무장약공을 중심으로 자유면을 확대시키는 공법이다.

### 2.3 SUPEX-cut 발파패턴

SUPEX-cut(SK-cut) 발파공법은 기존의 발파공법인 경사공 및 수평공 심빼기 발파공법의 단점들을 보완하면서 더 높은 발파효율을 얻을 수 있도록, 터널발파에서 가장 핵심이 되는 심빼기의 저항선을 2단계로 나누어 파괴하는 방법이다. SUPEX-cut공법의 심빼기공은 크게 심빼기 경사공과 심빼기 수평공으로 이루어져 있다.

즉, 심빼기의 1단계로 경사 V공에 의하여 저항선의 80%이상을 뽑아내고 2단계로 수평 심발공에 의하여 나머지 부분을 완전히

뽑아냄으로써 완벽한 2자유면이 형성되는 것이다. 이때 1단계에서는 장약된 경사 V공이 자유면에 대한 투사면적이 크고 V공 내부에 천공된 많은 수평공의 무장약 부분이 자유면 역할도 하게 함으로써 발파효과를 극대화시키고 2단계에서는 1단계의 심빼기로 형성된 새로운 자유면을 이용하게 되므로 나머지 발파부분이 조절되어 전체적으로 높은 심빼기 효과를 가져오는 것이다.

심빼기 각도공은 주 각도공인 main V-hole과 보조각도공인 baby V-hole, sub V-hole로 구성되며 현장 여건에 따라 main V-hole, baby V-hole, sub V-hole의 세 가지 각도공을 서로 조합하여 설계할 수 있고,

발파진동 및 발파소음 등의 발파공해를 감소시키고자 할 때, 또는 극경암일 경우 중앙 심빼기 부의 보다 확실한 파쇄 효과를 얻고자 할 때는 위의 2~3가지 각도공을 적절히 혼용하여 설계하면 좋은 효과를 기대할 수 있게 설계되어 있다.

심빼기 수평공은 좁게는 심빼기 발파에, 넓게는 발파당 굴진장의 증감에 중요한 영향을 미치므로 세심한 설계가 필요하다. 심빼기 수평공은 약 2~17공으로 이루어져 현장 여건에 따라 다소 변화의 폭이 크다.

심빼기 수평 중앙공 및 심빼기 수평 보조공들이 공간격 및 최소저항선은 발파 진동 및 소음 그리고 중앙 심빼기부 암석

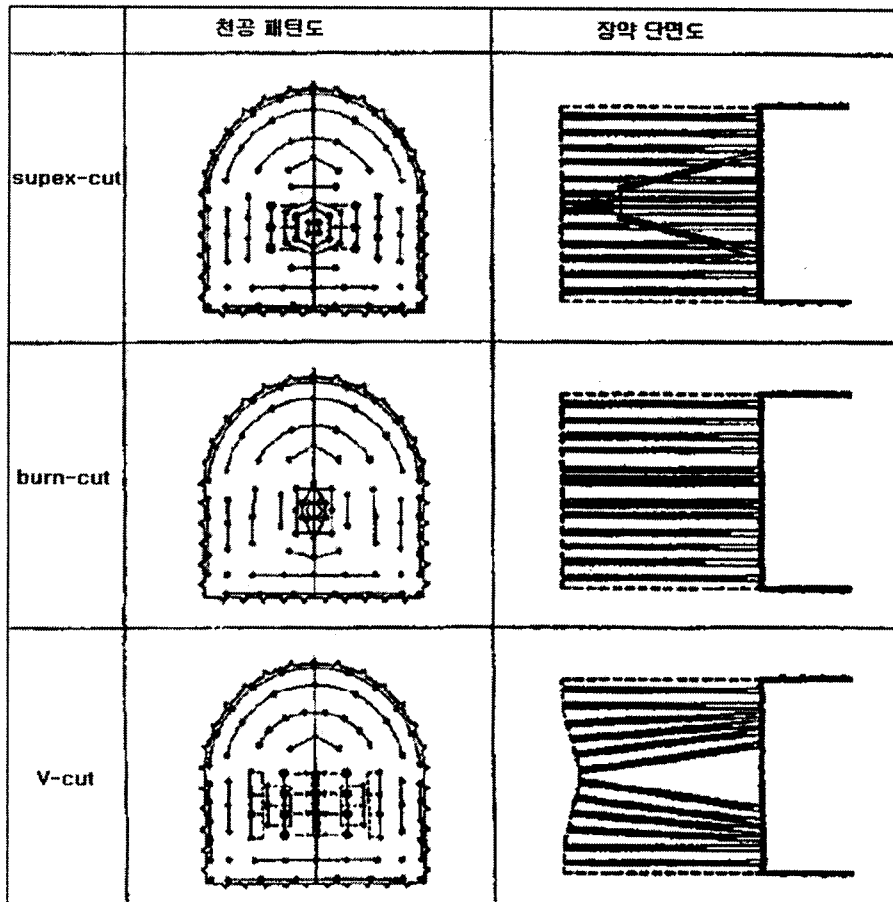


그림 1. 발파공법별 천공패턴 및 장약단면도

버력의 크기, 암석의 연경도 정도에 따라 심빼기 수평공의 천공수가 결정되며, 이에 따라 기하학적인 측면에서 결정되므로 잘 활용하는 것이 중요하다.

### 3. 진동 측정을 위한 시험발파

#### 3.1 지질조건

시험발파를 실시한 곳은 경상남도 일대의 도로개설을 위한 터널굴착 현장으로써 월등한 경제성과 안정성이 입증되어 도심지 및 산악지역의 대부분 터널에 적용되는 NATM(New Austrian Tunneling Method) 공법을 채택하여 V-cut 심빼기 공법으로 발파를 시행하였다. 터널 현장의 지질은 중생대 백악기 경상누층군의 신라층군에 속하는 퇴적암류 및 화성암류와 백악기 불국사층의 화강암으로 구성되어 있으며, 대상암석의 물성은 표 1과 같다. 이 지역은 특히 경상분지의 퇴적암 중 함안층인 경우 남지에서 두께가 1400m로 확인되며 칠서지방 산업공업단지 내 적색 세일에서는 공룡 족흔 화석이 발견되기도 한다.

지하 채굴이나 터널의 굴착, 기초암반 등의 설계 및 시공에서 암반을 공학적으로 다루는데에는 암석의 강도와 변형특성 등의 역학적 성질과 암석내에 발달한 균열, 절리, 층리 등 역학적 결합은 공학적 분류에 큰 영향을 미치는 요소이다. 균질 신선암은 암석 자체가 역학적 결합을 가지고 있지 않은 균질하고 신선한 상태의 암석을 말하며, 일반적으로 시추코어 등 현장에서 채취한 작은 크기의 암석을 선별하여 균질 신선암으로 취급한다. 균질암석은 주로 실험실에서 얻어지는 일축압축강도와 탄성계수비 등의 역학적 성질에 따라 분류할 수 있다.

표 1 대상암석의 물성

암석 종류	화성암	
비 중	2.63	
공극률 (%)	1.03	
포아송 비	0.27	
탄성파속도 (m/sec)	P-파	3780
	S-파	1790
인장강도 (kg/cm <sup>2</sup> )	90	
일축압축강도 (kg/cm <sup>2</sup> )	1100	
영률 (×10 <sup>5</sup> kg/cm <sup>2</sup> )	6.36	
내부마찰각 (°)	59	
점착력 (kg/cm <sup>2</sup> )	220	

#### 3.2 계측 위치 선정

시험발파는 지발당장약량과 발파원으로부터 진동측정기의 설치지점까지의 거리를 조절하여 환산거리가 적당하여야 하며, 동일발파에 대해 여러 환산거리에서의 최대진동속도를 측정하기 위해서는 여러 대(3~4대)의 발파진동측정기를 사용하는 것이 좋다.

그러나 현장사정상 환산거리의 분포를 기준으로 정밀하게 실시하지는 못하였고, 그림 2에서와 같이 실측 지점의 거리를 기준으로 하여 터널 직상부 진행직각방향으로 30m, 60m, 100m 지점에 각각 3대의 계측기를 배열하였고, 마찬가지로 터널 진행방향에서는 30m, 60m, 100m를 기준으로 하여 계측기를 설치하였다.

#### 4. 진동측정 및 결과

##### 4.1 지반진동의 특성

계측현장 전체를 기준으로 '터널 진행방향'에서 9개, '터널 진행직각방향'에서 9개를 획득하여 총 18개의 DATA를 기준으로 해당 장약량 자승근 환산거리 및 삼승근 환산거리 그리고 최대장약량 자승근 환산거리 및 삼승근 환산거리를 계측현장별 비교와 마찬가지로 회귀분석을 통한 신뢰수준 50% 및 95%에서 상관성 및 감쇠특성을 분석한 결과 표 2와 3에서와 같이 나타났으며 진동의 감쇠는 '터널 진행방향'에서 더욱 크게 나타났으며, '터널 진행직각방향'에서는 적게 나타났다.

##### 4.2 지발당 최대허용장약량 산출

신뢰도에 따라 50%, 95%의 측정자료를 포함하는 발파진동식을 이용하여, 진동속도의 허용치에 따라 발파설계에 적용할 지발당 최대장약량과 안전거리를 구할 수 있다. 즉 구해진 발파진동식을 이용하여 구조물에 피해를 미치지 않는 진동속도의 허용기준으로부터 환산거리를 결정한다. 이 환산거리는 지발당 최대장약량과 폭원으로 부터의 거리의 관계를 나타내는데, 신뢰도에 따라 그림 3~그림 6과 같은 노모그램의 로그-로그 좌표상에 실선으로 나타내었다.

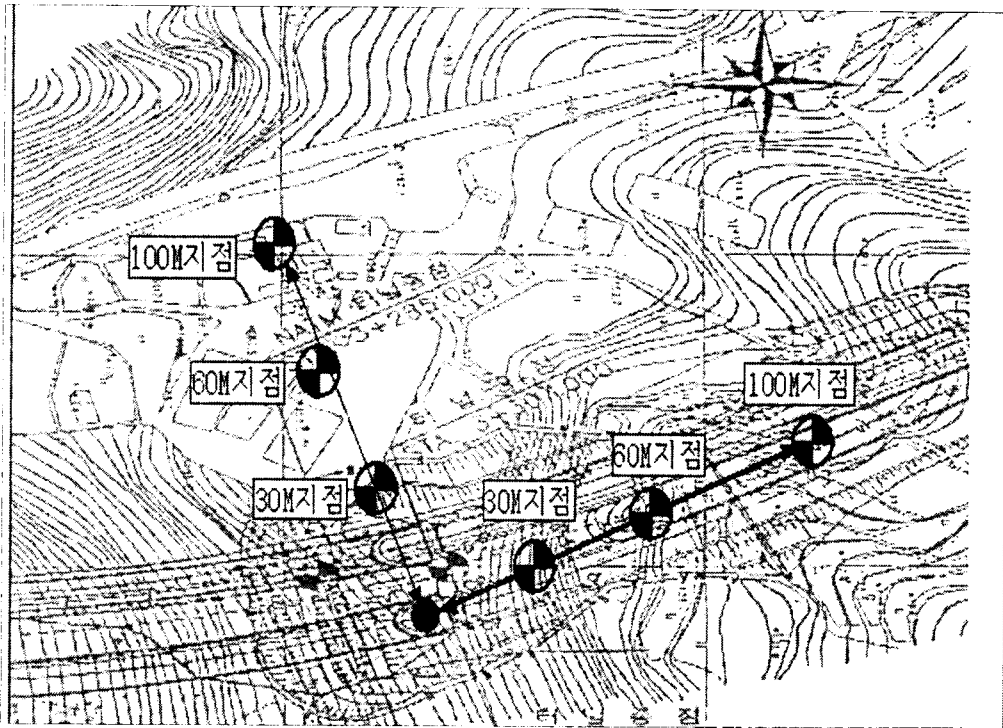


그림 2. 계측기 설치위치

표. 2 신뢰도에 따른 자승근 환산거리의 비교

측정 방향	데이터	자승근 환산거리	
		50%	95%
터널 진행방향	9	$3844(D/W^{1/2})^{-1.99}$	$7172.93(D/W^{1/2})^{1.99}$
터널진행 직각방향	9	$217.65(D/W^{1/2})^{1.26}$	$417.3(D/W^{1/2})^{1.26}$

표. 3 신뢰도에 따른 삼승근 환산거리의 비교

측정 방향	데이터	삼승근 환산거리	
		50%	95%
터널 진행방향	9	$4139(D/W^{1/2})^{-1.99}$	$7723.94(D/W^{1/2})^{1.99}$
터널진행 직각방향	9	$284.68(D/W^{1/2})^{1.26}$	$437.32(D/W^{1/2})^{1.26}$

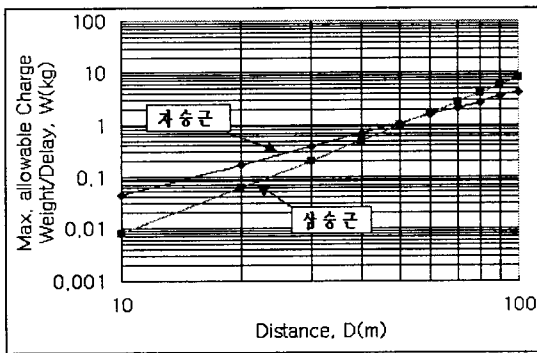


그림 3. 한계허용진동속도 3mm/sec로 제어하기 위한 환산도표\_진행방향

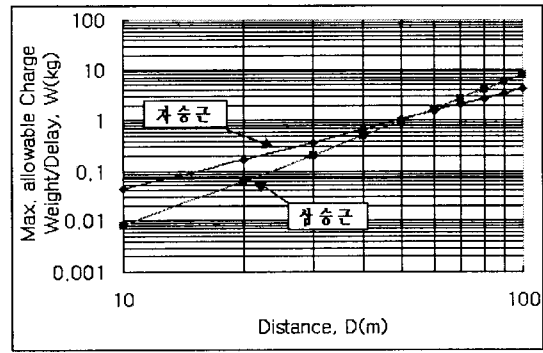


그림 5. 한계허용진동속도 3mm/sec로 제어하기 위한 환산도표\_진행 직각방향

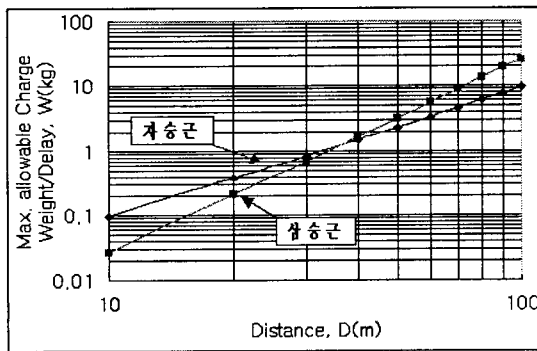


그림 4. 한계허용진동속도 5mm/sec로 제어하기 위한 환산도표\_진행방향

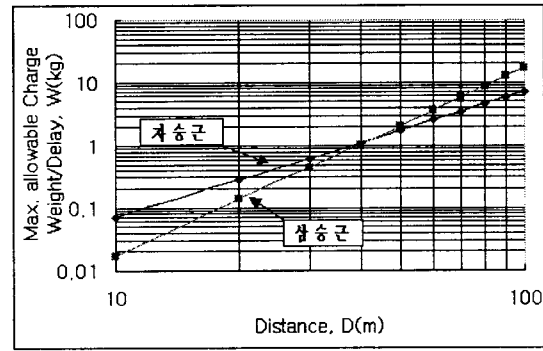


그림 6. 한계허용진동속도 5mm/sec로 제어하기 위한 환산도표\_진행 직각방향

### 4.3 주파수 특성 분석

발파진동의 주주파수는 대개 노천석탄 광산이나 채석장 발파와 같이 대규모 발파에서는 저주파수 대역이 우세하고 건설발파나 터널발파와 같이 소규모 발파에서는 고주파수 대역이 우세하다고 알려져 있다. 그림 7은 터널발파 진동을 계측위치별로 주진동수와 거리를 비교한 결과이며, 계측위치별로 주진동수와 PPV를 비교한 결과는 그림 8과 같다. 계측위치별로 주진동수, PPV 및 거리를 비교 대상으로 분석을 실시한 결과 계측된 Data는 20~120 Hz 이상의 넓은 분포를 이루고 있으며, 터널진행 방향에서 발파진동 세 성분의 주파수 분포가 높게, 터널 진행 직각방향에서 상대적으로 저주파의 성분이 우세한 것으로 나타났다.

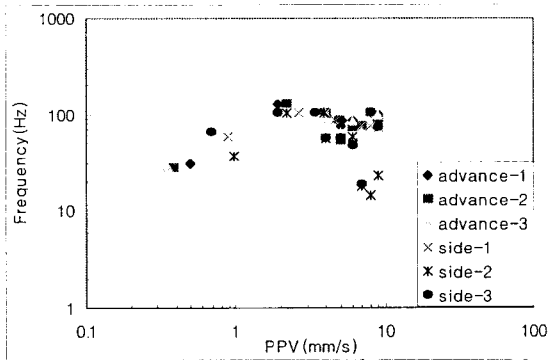


그림 7. 주파수와 거리와의 비교

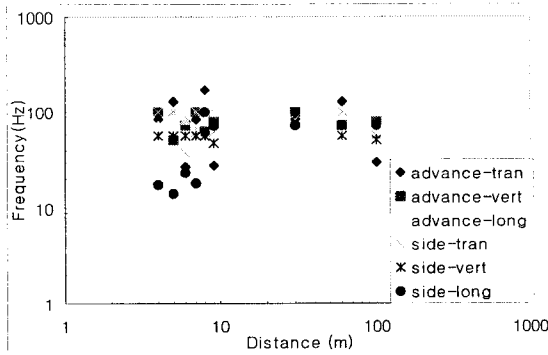


그림 8. 주파수와 최대 입자 속도(PPV)와의 비교

### 5. 결론

계측위치별로 최대장약량을 적용한 자승근 환산거리와 입방근 환산거리 그리고 주파수 특성을 비교·분석 후 다음과 같은 결론을 얻었다.

1) 거리의 분포가 광범위한 터널외부에서 계측된 DATA는 주파수가 30~120Hz의 넓은 분포를 이루었으며, 따라서 근거리에서는 고주파의 성분이 우세하였고, 원거리에서는 저주파의 성분이 우세한 것으로 보아 거리가 멀수록 진동대역이 저주파 쪽으로 편위한다는 연구와 유사한 경향을 나타냈다.

2) 진동전달 특성 및 주파수 특성을 비교 대상으로 하여 상호 비교·분석한 결과, 현장 상황 및 발파 조건에서 어느 정도 차이가 있으나, 적정 환산거리를 추정하여 발파현장에서 안전하게 적용하기 위해서는 한계허용진동속도를 기준으로 자승근과 삼승근의 교차점을 분석하여 최대 지발당 장약량을 적용하는 것이 바람직하며 터널발파에서 근거리인 경우 자승근 환산거리 보다는 삼승근 환산거리를 적용하여 설계하는 것이 바람직할 것으로 판단된다.

3) 보편적인 발파기준에 의한 경우 자승근 환산거리와 삼승근 환산거리로 허용진동속도 3mm/sec에서 교차점은 62m였으며, 5mm/sec에서 교차점은 46m이었다.

진동측정 결과는 현장의 거리별 지질 특성에 따라 모든 발파변수를 감안할 수 없다는 제약 조건을 가지고 있다. 대부분이 화성암으로 된 지반이지만 단층과 같은 불연속면이나 심한 풍화에 의한 파쇄대가

부분적으로 분포하였기에 똑같은 화성암 지반 터널이라도 현장 상황에 따라 결과 값이 상이하게 나올 수도 있을 것으로 판단된다.

### 참 고 문 헌

1. 김수석, 1986, Mohr-Coulomb 항복기준에 지배를 받는 탄점소성체의 유한요소해석, 부산대학교 대학원 박사학위논문, pp.3
2. 안명석·이광열·윤성현·정진교, 2002, 발파시공의 정밀도가 품질 및 유지관리에 미치는 영향, 한국터널공학회 춘계학술 발표회 논문집, pp.131
3. 천병식, 오민열, 1995, 바닥발파에서 암질지수(RQD)와 발파진동상수 K, n의 관계, 한국지반공학회지, 제28권 제3호, pp55~67
4. 이정인, 류창하, 1979, 발파작업에 의한 지반진동이 지상구조물에 미치는 영향에 관한 연구, 대한광산학회지, Vol. 16, pp.41~50
5. 김희창·안명석·김종현, 2000, 화약 및 화공품의 역사와 향후 전망에 관한 연구, 대한화약발파공학회지, Vol.18 pp.7~13
6. 양형식, 주재성, 1992, 노천굴 발파의 진동특성과 입지상수 결정에 관한 연구, 한국자원공학회지, Vol. 27, pp. 316~323
7. 안명석·류창하·박종남, 2001, 건설현장에서 안전성 향상을 위한 지반진동·소음·비산먼지 측정자료의 분석에 관한 연구, 대한화약발파공학회지, Vol.19, pp.99
8. 류창하, 1995, 발파에 의한 지반진동의 수준 및 주파수 특성예측, 한국자원공학회 최신엔지니어링 발파 특별 심포지움 논문집, pp. 132~141
9. 이광열, 2001, “이암계통 세일로 구성된 절취사면의 안정성분석 연구” 동서대학교

연구센터논문집 제42집 pp.179~194

10. 영남건설기술교육원, 1996, 암반분류법·파쇄공법 및 계측관리 pp.58
11. Amitava Ghosh, Jaak J. K. Daemen, 1985, Statistics - A key to better blast vibration prediction, Proc. 26th US Symp. on Rock Mech., Rapid City, SD, pp. 1141~1149
12. G. M. Friedman & J. E. Sanders, 1978, Principles of Sedimentology, John Wiley & Sons, New York, pp. 187~189
13. W. H. Twenhofel, 1950, Principles of Sedimentation, Mc Graw-hill Book Co. Inc pp.317
14. Robert R. Campton, 1985, Geology in the Field, Jone wiley & Sone corp.
15. S. P. Singh, 1993, Prediction and Determination of Explosive induced Damage, Proc, 4th Int. Symp. on Rock Fragmentation by blasting, Vienna, pp. 183~192.