

화산암질 안산암 및 응회각력암에서의 발파특성 분석

김영덕^{*1}, 우동찬^{*2}, 조만섭^{*3}, 손의권^{*2}, 이태노^{*4}

1. 머리말

도로 및 터널설계 과정에서의 발파설계는 발파진동에 의한 영향을 평가하기 위해 국내외의 경험적 관계식을 활용하거나 현장에서의 시험발파를 수행하여 평가하고 있다. 이와 같이 설계 단계에서 경험적 관계식 혹은 시험발파 결과들에 대해서 기존의 유사한 암종에서 구한 결과와 어떤 차이를 보이는지 검증해 볼 기회가 마땅하지 않다. 물론 유사한 암종에서도 암반의 연경정도, 절리군, 지하수 등의 많은 Factor에 따라 상이한 결과가 나올 수밖에 없다. 하지만, 유사 암종에서 수집된 DB를 이용하여 통계적 처리를 통하면 임의의 조건에 대한 유사한 경향을 찾아볼 수도 있을 것이다. 이러한 유사성을 이용하여 Project 지역에서 직접 수행한 결과를 상호 비교해 봄으로써 시험발파 결과의 신뢰성을 향상시킬 수 있을 것이다.

따라서 본 보고에서는 국내의 암종별 발파특성 분석을 수행하기 위한 첫 걸음으로써, 먼저 경상남도 청도군 지역의 화산암질 안산암에 대한 시추공 시험발파 및 실규모 터널 시험발파에서 구한 발파진동을 제시하였다. 이와 함께 터널 발파설계 시 수행하는 시추공 시험발파 결과와 터널 실규모 시험발파 결과를 비교해 보았으며, 터널 실규모 시험발파를 통해서 국내 터널 심발발파 종류별 발파진동을 분석하여 보

았다. 참고로 본 보고의 심발발파 종류별 발파진동 결과는 본 시험발파에 한정된 결과임을 먼저 밝혀두고 싶다.

2. 시험발파의 목적 및 방법

본 시험발파는 화산암질 안산암 및 응회각력암에서의 발파진동상수 선정을 위하여 실시하였고, 터널 및 사면굴착 설계 시의 발파진동 상수를 선정하기 위해 시험발파 시의 결과와 기존의 방법들을 상호 비교하여 보았다. 이를 위하여 기존의 경험적 관계식을 이용한 발파진동 영향을 분석하였고, 반경 2km 이내의 안산암 구역에서 2개, 응회각력암 구역에서 1개씩 각각 시추공 시험발파를 수행하였다. 또한 안산암 질암과 동일 암상을 보이는 시공 중 터널에서 실제 실규모 시험발파를 수행하였다. 터널 실규모 시험발파에서는 국내 터널설계에 대다수 적용되는 심발발파 공법별 특성들을 2회 이상 측정하여 상호 비교하였고, 심발부의 발파진동을 분석하였다. 표 1과 그림 1에는 시험발파 현황 및 종류별 제원을 요약하였다.

3. 시추공발파 및 터널 실규모 발파 진동 특성 분석

3.1 발파진동식 산정 이론

시추공에 대해 시행된 시험발파로부터 획득된 진

*1 정희원, (주)현대산업개발 토목설계팀

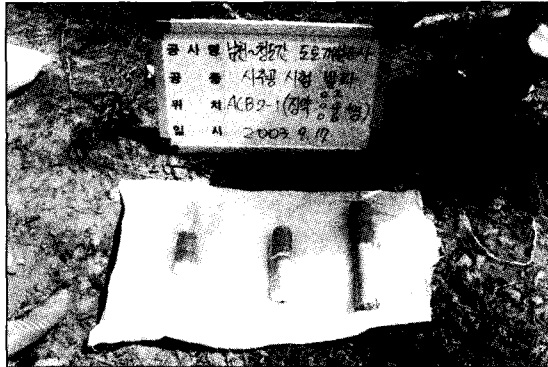
*2 (주)유니텍 토목사업본부 터널팀

*3 정희원, (주) SK건설 Geotask팀

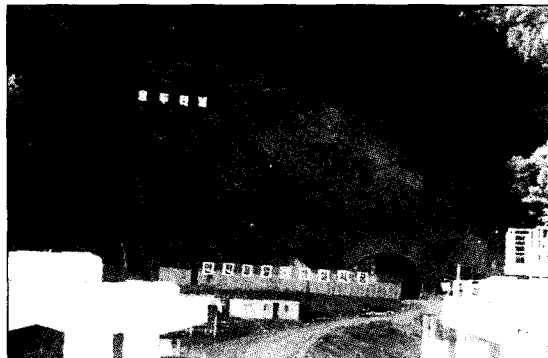
*4 (주)성보엔지니어링

표 1. 시험발파 종류 별 현황 및 제원

	시추공 시험발파	터널 실규모 시험발파
현 장	경상남도 경산시 남천면 ~ 청도군 매전면	대구 부산간 고속도로 7공구 현장 OO터널 (경남 밀양시 산외면 고정리)
암 종	화산암질 안산암 및 응회각력암	화산암질 안산암 및 유문암
암 반 상태	풍화암~경암 (RMR 25~70)	보통암(RMR 60)
시험 횟수	5개 공	8회
천 공	4 ~ 20m(시추공)	2.1 m(터널 천공장)
진동측정위치	10 ~ 70m(10m 간격)	80 ~ 120m(10m 간격)



(a) 시추공 시험발파



(b) 터널 실규모 시험발파

그림 1. 화산암질 안산암 및 응회각력암 지역에서 수행한 시험발파 전경

동 Data는 적절한 통계처리를 통해 폭약량과 거리 및 진동발생 수준에 대한 상관관계를 유도하였으며, 본 과업에서는 단순회귀분석을 통하여 진동 상수 K, n을 구하였다.

$$V = K \left(\frac{D}{\sqrt{W}} \right)^n$$

여기서, 양변에 Log를 취하면,

$$\text{Log } V = \text{Log } K + n \text{Log} \left(\frac{D}{\sqrt{W}} \right), \text{Log } V = Y,$$

$$\text{Log } K = a, \text{Log} \left(\frac{D}{\sqrt{W}} \right) = X, n = b$$

표 2. 시추공 시험발파로부터 구한 발파진동식

	자승근 환산거리(95%)	삼승근 환산거리(95%)
안산암질암 1	$V_{(95\%)} = 1809.23 \left(\frac{D}{\sqrt{W}}\right)^{-2.15}$	$V_{(95\%)} = 1909.48 \left(\frac{D}{\sqrt[3]{W}}\right)^{-2.24}$
안산암질암 2	$V_{(95\%)} = 41.15 \left(\frac{D}{\sqrt{W}}\right)^{-2.15}$	$V_{(95\%)} = 39.07 \left(\frac{D}{\sqrt[3]{W}}\right)^{-1.24}$
응회각력암	$V_{(95\%)} = 370.16 \left(\frac{D}{\sqrt{W}}\right)^{-1.72}$	$V_{(95\%)} = 259.84 \left(\frac{D}{\sqrt[3]{W}}\right)^{-1.69}$

이 되고, 일반식 $Y = a+bX$ 을 얻을 수 있다. 여기서, 최소 자승법을 이용하여 발파진동상수 K, n 산출할 수 있다.

$$a = \frac{\sum y}{n} - b \frac{\sum x}{n}, \quad b = \frac{n(\sum xy) - (\sum x)(\sum y)}{n(\sum x^2) - (\sum x)^2}$$

(n = b, k = 10^a)

회귀분석에 의해 진동상수(K, n)를 산출한 후, 자승근 환산거리(Square Root Scaled Distance)와 삼승근 환산거리(Cubic Root Scaled Distance)에 따른 발파진동추정식을 수립한다.

• 자승근 환산거리 : $SD = \frac{D}{\sqrt{W}}$

• 삼승근 환산거리 : $SD = \frac{D}{\sqrt[3]{W}}$

Log - Log Scale 그래프에 X축에 자승근 및 삼승근 환산거리 값을, Y축에 계측된 진동속도 값을 Plot 하여 획득된 진동상수 K, n을 발파진동추정식에 대입하면 “발파진동추정식”을 획득할 수 있다.

• 자승근 발파진동추정식 : $V = K \cdot \left(\frac{D}{\sqrt{W}}\right)^{-n}$

• 삼승근 발파진동추정식 : $V = K \cdot \left(\frac{D}{\sqrt[3]{W}}\right)^{-n}$

3.2 시험발파를 통한 화산암질 안산암 구간 내 발파진동식 선정

1) 시추공 시험발파에 의한 발파진동식 선정

시추공 발파시 적용된 장약량은 0.2~0.8kg으로 발파진동 추정식에서 요구되는 환산거리 (SD,

$\frac{D}{\sqrt{W}}$ or $\frac{D}{\sqrt[3]{W}}$, Scaled Distance)의 장약량(W, kg)

과 거리(D, m, 발파 심도)에 변화를 준 것은 발파 진동 추정 식의 회귀분석 시 충분한 자료를 획득하기 위함이다. 본 시추공 시험발파에 사용한 화약은 예물 종류 폭약과 비전기식 뇌관을 사용하였다.

표 2에는 화산암질 안산암 및 응회각력암 지역의 3개 시추공시험발파로부터 구한 발파진동식을 나타낸 것이다.

2) 실규모 터널 시험발파에 의한 발파진동식 선정

터널에서의 실규모 시험발파로부터 구한 발파진동식은 총 8회의 발파진동 결과들을 종합하여 산출하였는데, 국내의 터널설계에서 적용하고 있는 4개 심 발발파공법에 대하여 각 2회씩 발파하여 심발부와 확대부를 구분하여 측정하였다. 본 시험발파에서의 천공장은 암반분류 및 지보패턴에 따라 2.1m로 하였으며, 사용 화약류는 예물종류 폭약과 비전기식 뇌관을 사용하였다.

표 3에는 화산암질 안산암 지역에 건설 중인 터널에서 구한 발파진동식을 나타낸 것이다.

표 3. 실규모 터널 시험발파에 의한 심발부 및 확대부 발파진동식 산정

	자승근 환산거리(95%)	삼승근 환산거리(95%)
심발부	$V = 56.3 \left(\frac{D}{\sqrt{W}} \right)^{-1.33}$	$V_{(95\%)} = 1909.48 \left(\frac{D}{\sqrt[3]{W}} \right)^{-2.24}$
확대부	$V_{(95\%)} = 41.15 \left(\frac{D}{\sqrt{W}} \right)^{-2.15}$	$V_{(95\%)} = 39.07 \left(\frac{D}{\sqrt[3]{W}} \right)^{-1.24}$

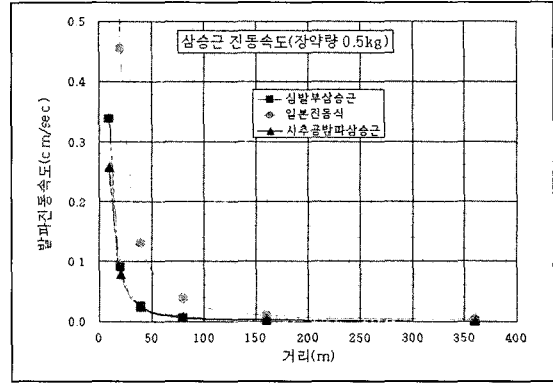
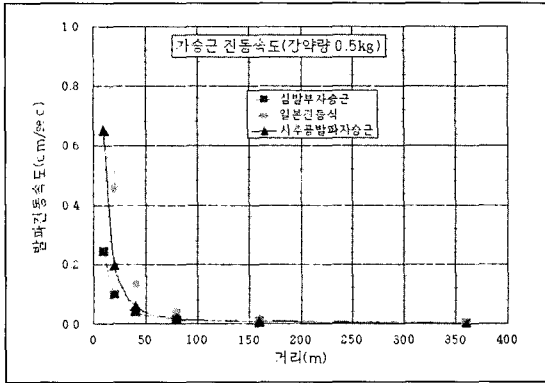


그림 2. 경험적 방식과 시험발파 결과로부터 구한 발파진동 경향 분석

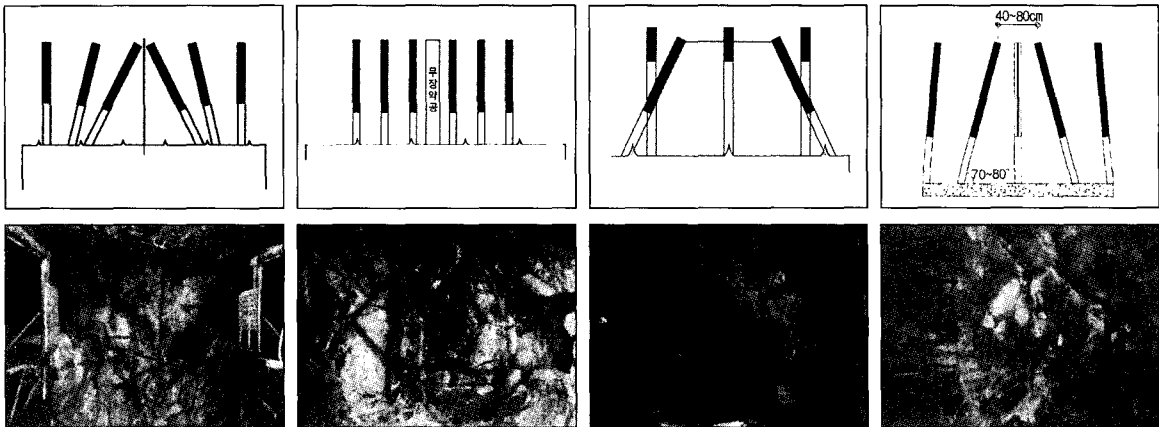


그림 3. 터널 심발발파 종류별 시험발파 개념 및 실규모 시험발파 전경

3) 시추공 시험발파와 실규모 터널 시험발파 비교
 일반적으로 터널에서의 발파진동상수 선정을 위하여 기존의 경험적 관계식과 시추공 시험발파, 석산 등에서 실시하는 심발부 옥외 시험발파, 터널 내 실제 실규모 발파 시의 결과 이용할 수 있다. 본 보고

에서는 터널 설계 시의 발파진동 상수를 선정하기 위해 표 2와 3에서 구한 시험발파 결과와 일본의 雑候謙에 의해 제시된 $V = K \cdot W^n \cdot D^{-1.8}$ ($K=200, n=1.0$) 경험적 관계식을 그림 2와 같이 상호 비교 하여 보았다.

그림 2에서 보는 바와 같이 일본의 雑喉謙에 의해 제시된 경험식의 경우 발파 진원지로부터 근거리에서 현장 실험한 결과와 큰 차이를 보이고 있다. 또한 시추공발파와 터널 심발부 진동속도 비교에서는 50m 이내의 근거리에서 적합한 삼승근의 경우가 시추공발파에 의한 결과보다 다소 보수적으로 나타났다.

3.3 화산암질 안산암 구간에서의 터널 심발발파 공법별 진동특성 분석

3.1에서 언급한 바와 같이 터널에서의 실규모 시험발파를 수행함과 동시에 국내 터널설계에서 많이 사용되는 심발공법들에 대한 발파진동을 분석해 보았다. 그림 3은 본 시험발파에서 적용한 심발발파공법들의 개요와 터널 막장면에서의 천공 후 모습을 나타내었다.

본 터널 실규모 시험발파의 심발부에서 발생한 발파공법별 발파진동의 크기를 『Advance Module Program』을 이용하여 분석한 결과를 그림 4에 나타내었다. 측정거리 120m 지점의 발파진동 이력곡선에 대한 심발부의 발파진동 최대크기는 1차 시험발파의 경우, V-Cut 0.102cm/sec, Cylinder-cut 0.303cm/sec, SUPEX-Cut 0.349cm/sec, COPA-Cut 0.071cm/sec으로 나타났으며, 2차 시험발파는 V-Cut 0.378cm/sec, Cylinder-cut 0.140cm/sec, SUPEX-Cut 0.129cm/sec, COPA-Cut 0.108cm/sec으로 비교적 COPA-cut의 발파진동이 낮게 나타났다.

그리고 천공 및 발파 작업자의 작업공정의 적응 정도와 천공과정의 오차를 고려할 때 발파 횟수가 증가할수록 안정적인 결과를 보이고 있으며, V-cut, Cylinder-cut, SUPEX-cut의 경우 1차 결과와 2차 결과의 차이가 다소 크게 나타났다.

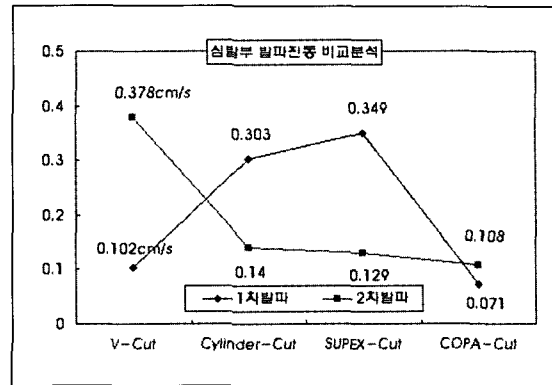


그림 4. 심발발파 공법별 실규모 시험발파에서 구한 발파진동 결과

4. 맺음말

국내의 암종별 발파특성 분석의 필요성을 위하여 경상남도 청도군 지역의 화산암질 안산암에 대한 시추공 시험발파 및 실규모 터널 시험발파에서 구한 발파진동을 암종별로 구분하여 제시하였다. 이와 함께 터널 발파설계 시 수행하는 시추공 시험발파 결과와 터널 실규모 시험발파 결과를 비교해 보았으며, 일본의 雑喉謙에 의해 제시된 경험식의 경우 발파 진원지로부터 근거리에서 현장 실험한 결과와 큰 차이를 보이고 있다. 또한 시추공발파와 터널 심발부 진동속도 비교에서는 50m 이내의 근거리에서 적합한 삼승근의 경우, 터널 실규모 시험발파의 결과가 시추공발파에 의한 결과보다 다소 보수적으로 나타났다.

그리고 터널 실규모 시험발파를 통해서 국내 터널 심발발파 종류별 발파진동을 분석한 결과, COPA-Cut이 비교적 적은 진동속도를 나타내었고, 작업자의 공법에 대한 적응도와 천공오차는 발파 횟수가 증가할수록 비교적 안정적인 결과를 보이고 있다.