

시추공 발파 자료의 터널설계 적용성에 관한 연구

임성식, 양형식¹⁾

A study on Tunnel Design Application of Borehole Blasting Data

Seong-Sik Lim, Hyung-Sik Yang

초 록. 터널 및 지하공동 설계에 이용된 16개 지역 23개 구간의 578개의 시추공 진동 data와 일반터널 4개 지역으로부터 221개 data를 이용하여 시추공발파의 진동전달 특성을 분석하였다. 시추공발파와 일반발파의 진동속도 감쇠 경향을 비교분석한 결과 시추공발파의 입지상수들이 크게 나타났다. 환산거리 증가에 따른 두 진동식의 최대 허용장약량은 시추공발파가 적었다. 이러한 결과로부터 시추공발파 자료를 터널발파 설계에 사용할 수는 있으나 조심스러운 통계적 처리가 불가피할 것으로 판단된다.

핵심어 : 시추공발파, 진동, 터널설계

1. 서 론

최근 건설업체에서는 발파 공해에 대한 민원을 방지하면서 효과적인 시공을 위해 지반조사 단계에서 시추공을 이용해 발파를 하고 이로부터 예측된 진동식을 설계에 직접 이용하는 일이 많다.

시추공발파는 일반적으로 실제 터널의 시공단계에서의 발파와 여러 가지 조건에서 상이하다. 특히 시공단계의 발파는 1자유면 또는 자유면이 두 개 이상인 상태에서 발파가 이루어지지만 시추공발파는 무자유면에서 수행된다. 또한, 시추공발파는 지발발파를 이용하는 터널발파와 달리 제발발파로 이루어진다.

국내에서는 지금까지 지표발파의 진동특성¹⁾, 터널발파의 진동특성²⁾, 이 둘을 비교한 연구³⁾들이 있었지만 시추공발파에 대한 연구는 거의 이루어지지 않았다. 따라서 본 연구에서는 시추공발파의 진동특성을 분석하여 이를 일반터널발파 분석결과와의 비교를 통해 이들 진동 자료들이 설계와 시공에 충분히 반영될 수 있는 가이드라인을 제시하였다.

2. 자료 획득

본 연구에 사용한 시추공 data는 문헌연구와 실제 측을 통하여 획득하였다. 시추공발파 data는 이미 설계에 사용된 보고서를 통해 18개 site에서 458개의 data, 실 측을 통해 5개 site로부터 120개의 data를 획득하였다. 터널발파의 자료는 4개 지역에서 221개 data를 측정하여 분석에 이용하였다. 또한, 1개 지역에서 실 측한 8개의 시추공발파 진동 data와 8개의 누두공발파 data를 분석에 포함 시켰다. 측정 지역은 고흥, 덕소, 무안, 보성, 부산, 서울, 성남, 성산, 여수, 장흥, 제천, 진주, 청주 등 전국에 분포한다.

3. 진동특성 비교분석

Table 1은 획득된 data 전체를 이용하여 시추공발파와 일반발파의 입지상수를 구한 것이다. 여기서 환산거리(Scaled Distance)는 자승근($m/kg^{1/2}$) 또는 입방근($m/kg^{1/3}$)의 두 가지로 계산하였으며 표에서 K0, K1, K2는 50, 95 및 99%의 신뢰구간을 갖는 발파진동상수이고 n은 감쇠지수, r은 상관계수이다.

진동전달 특성은 삼승근환산거리의 상관계수가 자승근보다 0.01~0.02정도 높게 나왔다. 하지만 그

1) 전남대학교 건설지구환경공학부
접수일 : 2003년 5월 15일

차이는 근소하였다. 본 연구에서는 장약량, 거리 및 지반조건의 변화가 심한 경우 더 적합한 것으로 알려진 자승근환산거리를 중심으로 비교 분석을 하였다.

입지상수 K는 안전율과 경제성을 고려하여 설계에 적용하고 있는 95%의 신뢰구간 K1을 대상으로 분석하였다. 전체 site의 K1은 시추공 발파의 경우 7130 mm/s로 일반 터널발파의 2510 mm /s 보다 3배가량 높았다.

시추공발파 진동식의 감쇠지수 n은 -1.66으로 -1.46인 일반터널발파에 비해 다소 큰 값을 보였다. 이는 무자유면 상태의 시추공발파로 인한 진동이 1자유면 이상의 터널발파에 비해 더 크게 발생하는 반면 감쇠가 빠르게 진행된다는 것을 의미한다.

Fig. 1은 시추공발파(borehole)와 터널발파(tunnel)를 통한 진동 자료의 분포특성을 나타낸 그래프이다. 시추공발파의 최대 진동 속도치가 SD 40 이하인 범위에서 터널발파의 진동치보다 높고 SD가 50 이상인 범위에서는 더 낮음을 알 수 있다.

시추공시험발파를 통해 예측한 진동식이 실제 설계에 사용될 경우 미치는 영향정도를 평가하기 위해 제안식들에 대한 LSD(Limit of scaled distances)를 비교하였다(Table 2). 참고로 LSD는 허용진동수준에서 1 kg의 폭약을 사용했을 때 이격거리를 의미한다.

Table 2를 토대로 허용진동속도가 주어졌을 때 거리별 장약량의 변화를 살펴보았다. Fig. 2에서는 서울지하철 진동허용기준 중 상가건물이나 아파트에 적용된 10 mm/s를 기준으로 100 m 거리에서의 최대허용 장약량을 구한 것인데, tunnel과 borehole의 허용장약량이 각각 5.2 kg 및 4.3 kg으로 tunnel에서 1.2배 이상 높게 나타났다. 이 결과는 일반터널발파로부터 예측한 진동식보다 시추공 시험발파로부터 예측한 진동식이 허용장약량을 기준으로 볼 때 다소 보수적인 평가가 됨을 알 수 있다.

Table 1. Site factors.

	Number of measured point	Square root scaled distance					Cubic root scaled distance				
		r	K ₀	K ₁	K ₂	n	r	K ₀	K ₁	K ₂	n
Borehole	578	0.80	1880	7130	12400	-1.66	0.81	2140	8060	14000	-1.70
Tunnel	221	0.80	877	2510	3890	-1.46	0.82	1900	5280	8070	-1.49

Table 2. Limit of scaled distances for 4 vibration Level

section	Site factors of 95% confidence		Limit of scaled distances (m/kg ^{1/2})			
	K ₁	n	3mm/s	5mm/s	10mm/s	25mm/s
borehole	7130	-1.66	109	80	53	30
tunnel	2510	-1.46	101	71	44	24
Dowding ⁴⁾			90	54	27	11

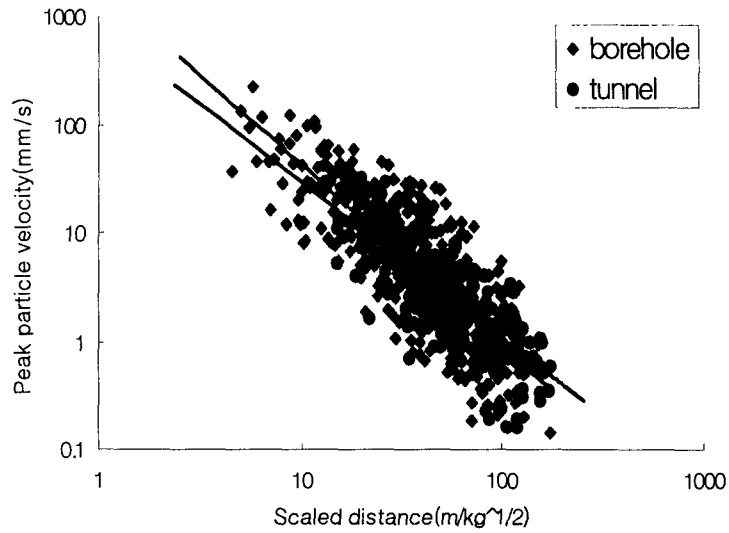


Fig. 1 Distribution of peak particle velocities from the borehole and tunnel blasting.

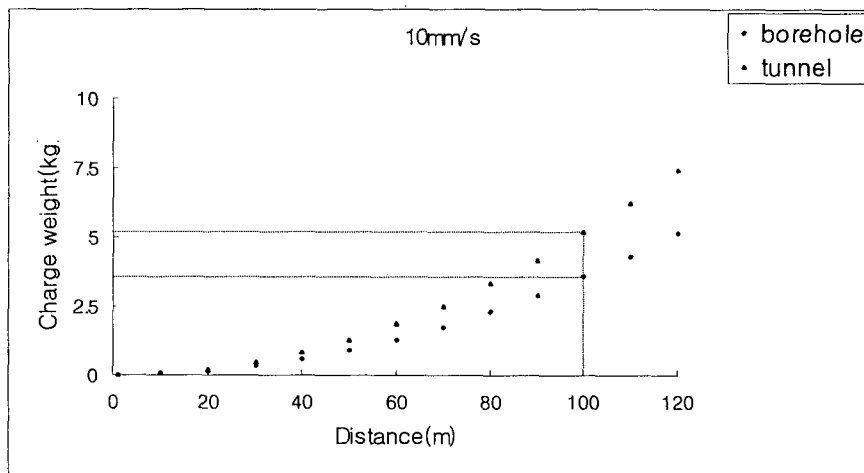


Fig. 2 Maximum permitted charge weight versus distance.

4. 시추공발파와 누두공발파

시추공발파와 누두공발파에서 구해진 진동식을 비교하기 위해 한 지역을 선정하여 같은 시추공 내에서 시험을 하였다. 여기서 누두공발파는 1자유면 상태에서의 진동전달특성을 파악하기 위해 선정된 방법이다. 대상지역은 암반층이며 각각 1회씩의 발파를 통해 8개씩의 data를 얻어 분석하였다.

Fig. 3은 시추공과 누두공, 그리고 일반 터널발파의 진동특성을 비교한 그래프이다. 여기서 터널발파(tunnel)의 진동식은 Fig. 1의 일반 터널발파 진동전달식을 다시 나타내었고 누두공발파는 'crater'로 표현하였다.

95% 신뢰구간의 입지상수 K1은 borehole > tunnel > crater 순으로 나타났으며 감쇄지수 n도 -1.90, -1.66, -1.35 으로 같은 순서를 보였다. 이 결과로부터 시추공발파는 일반적인 터널발파보다 진동은 크게 발생하고 감쇄가 빨리 일어난다는 것을 제차 확인할 수 있었다. 또한 지표발파의 특성을 지니는 1자유면 누두공발파는 시추공발파에 비해 터널발파의 진동전달 특성에 좀더 부합하나 역시 K와 n값에 다소간 차이를 나타내었다.

5. 시추공발파 진동 주파수 특성

시추공발파의 진동 주파수 특성을 살펴보기 위해 시간이력과 FFT 분석을 통한 주진동수를 산정하였다. Fig. 4는 분석 결과를 보여주는데 주진동수가 60~80 Hz사이에 나타남을 알 수 있다. 이는 건설발파의 경우 50~100Hz의 주진동수를 나타낸다는 Dowding⁹⁾의 결과와 일치한다고 볼 수 있다.

그림에는 나타나 있지 않지만 지표발파에 가까운 누두공발파의 경우 20~40 Hz에서 주진동수를 보여 시추공발파보다는 그 값이 낮았다.

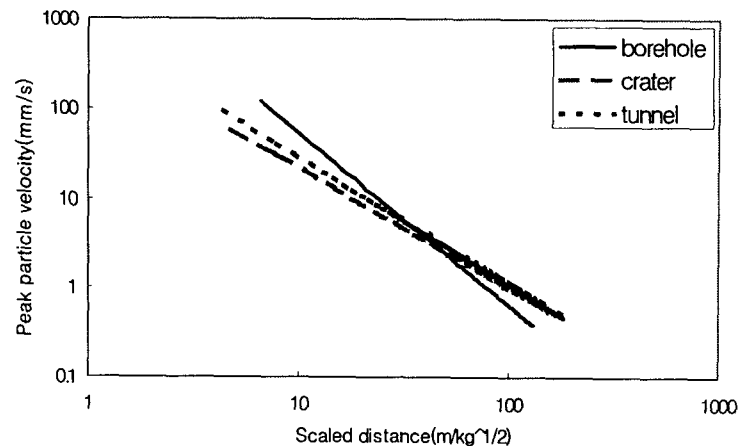
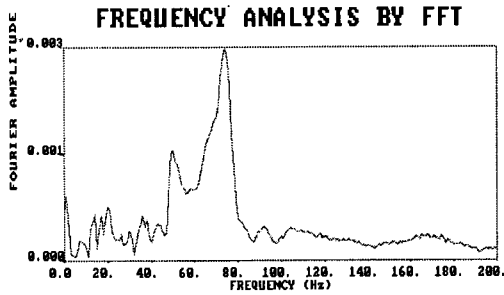
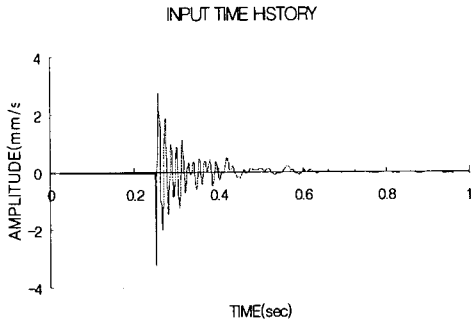


Fig. 3 Relations between scaled distance and peak particle velocity.



진동상수에 비해 높게 나타났다. 1자유면 누두 공발파의 진동상수들은 터널발파보다 낮았지만 시추공발파에 비해 터널발파의 진동전달 특성과 더 유사한 결과를 보였다.

- 4) 시추공발파의 진동 주파수 특성을 분석하기 위해 시간이력과 FFT분석을 통하여 주진동수를 산정하였는데 그 범위는 60~80Hz 이었다.
- 5) 시추공시험발파는 대상 지반의 진동전달 특성을 어느 정도 예측하는데 유용하다. 그러나 본 연구에서도 나타나듯이 일반적인 시험발파와는 달리 무자유면 상태에서 발파가 이루어지므로 실제 터널을 굴착할 때 발생하는 진동의 전달 특성과는 차이가 있다. 따라서 이를 설계에 반영하는 데는 조심스러운 통계적 처리가 선행되어야 할 것이다. 또 본 발파를 시행하기 전에 반드시 자유면이 있는 상태의 시험 발파를 시행하고 이를 시추공 시험발파의 결과와 비교하여 실제 터널 굴착에 적합한 진동식과 보안물건을 고려한 최대허용 장약량을 산정하여 효과적으로 발파작업을 하는 것이 바람직할 것으로 판단된다.

참 고 문 헌

6. 결론

23개 지역에서 얻어진 578개의 시추공시험발파 data와 4개 지역의 일반터널발파 221개의 data를 이용하여 시추공발파와 일반터널발파의 진동전달 특성을 비교 분석하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

- 1) 시추공 발파 전체 site의 95% 신뢰구간의 입지 상수 K1과 감쇠지수 n은 터널발파와 Dowding의 제안식보다 크게 나타났다.
- 2) 환산거리 증가에 따른 이격 거리별 허용장약량은 시추공발파가 터널발파보다 더 적어 비경제적인 설계가 될 수 있음을 보여주었다.
- 3) 시추공발파의 진동상수 K와 n이 누두공발파의

- 1. 양형식, 1990, 지표발파의 진동특성에 관한 기초 연구, 한국자원공학회지, Vol 27, 316~323.
- 2. 서영춘, 양형식, 하태욱, 2001, 터널발파의 진동 전달 특성에 관한 연구, 대한화약기술학회지, Vol 19.1, 41~51.
- 3. 범진삼, 주재성, 양형식, 1995, 진주 나동터널공사 지중발파의 진동특성, 한국자원공학회지, Vol 32, 350~356.
- 4. Dowding, C.H., 1985, Blasting Vibration Monitoring and control, Prentice Hall, Englewood Cliffs, 78~82.