

시추공 및 누두공 발파자료의 터널설계 적용

Tunnel Blasting Design with Equations Obtained from Borehole and Crater Blasting

양 형 식*¹ Yang, Hyung-Sik

임 성 식*² Lim, Seong-Sik

김 원 범*³ Kim, Won-Beom

Abstract

Characteristics of vibration propagation of borehole blasting were analyzed with 578 borehole vibration data obtained from 23 sites which were used in tunnel and underground space design, and 221 tunnel vibration data from 4 sites of tunnel under construction. Analysis results on the damping of vibration velocity show that site factors in borehole blasting were higher than those in tunnel blasting. And the critical charge calculated from regression equations at large scaled distance was lower in borehole blasting. Dominant frequency was in the range of 30~60Hz for the borehole blasting and 60~90Hz for the tunnel blasting. As a conclusion, the borehole blasting data should not be used on the tunnel blasting design without careful statistical analysis.

요 지

터널 및 지하공동 설계에 이용된 23개 지역의 578개의 시추공발파 진동 data와 시공 중인 일반터널의 4개 지역으로부터 221개 진동 data를 이용, 시추공발파의 진동전달 특성을 분석하였다. 시추공발파와 일반터널발파의 진동속도 감쇠 경향을 비교 분석한 결과 시추공발파의 입지상수들이 크게 나타났다. 환산거리가 클 때 최대 허용장약량은 시추공발파의 식으로 계산한 것이 더 적었다. 주진동수에 대한 주파수 분석결과 시추공발파는 30~60Hz, 일반터널발파는 60~90Hz로 나타났다. 이러한 결과로부터 시추공발파 자료를 터널발파 설계에 직접 사용하는데 다소의 문제가 있는 것으로 판단되며보다 정확한 설계를 위하여 통계적 처리가 불가피할 것으로 보인다.

Keywords : Borehole blasting, Dominant frequency, Tunnel blasting design, Vibration characteristics

1. 서 론

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

시추공발파는 일반적으로 실제 터널의 시공단계에서

의 발파와 여러 가지 조건에서 상이하다. 특히 시공단계의 발파는 1자유면 또는 자유면이 두 개 이상인 상태에서 발파가 이루어지지만 시추공발파는 무자유면에서 수행된다. 또한, 지발발파를 이용하는 일반터널 발파와 제발발파나 data수를 충분히 확보하기 위한 deckcharge 방법을 이용하는 것도 두 가지 발파조건 상이함을 나타내준다.

*1 정희원, 전남대학교 건설지구환경공학부 교수 (Member, Prof., Dept. Civil, Geosystem & Environmental Eng. Chonnam Nat'l Univ., hsyang@chonnam.ac.kr)

*2 정희원, 전남대학교 지구시스템공학과 석사과정 (Member, Dept. Geosystem Eng., Graduate School, Chonnam Nat'l Univ.)

*3 전남대학교 지구시스템공학과 석사과정 (Dept. Geosystem Eng., Graduate School, Chonnam Nat'l Univ.)

국내에서는 지금까지 지표발파의 진동특성(양형식, 1992), 터널발파의 진동특성(서영춘 외, 2001), 지표발파와 터널발파를 비교한 연구(범진삼 외, 1995)들이 있었지만 시추공발파에 대한 연구는 거의 이루어지지 않은 채 설계에 적용되고 있다. 본 연구에서는 시추공발파의 진동특성을 분석하여 이를 일반터널발파 뿐만 아니라 외국의 사례들과도 비교분석하여 시추공발파를 통해 얻어진 진동 자료들이 설계와 시공에 충분히 반영될 수 있는 가이드라인을 제시하였다.

2. 시추공발파

시추공발파는 지반조사과정에서 실내실험을 위한 암석코어를 채취하거나 BHTV(시추공이미지검층), 수압파쇄시험 등의 현장시험을 목적으로 천공된 시추공에서 행해지는 마지막 시험으로써 시추공 내 터널의 계획심도에 폭약을 장약하고 전색을 한 후 발파하여 이로부터 발생하는 진동이나 소음을 측정하는 방법이다. 발생한 진동·소음을 측정하고 간단한 처리를 거쳐 당 현장에 적합한 예상 진동식을 만들게 되는데 이를 설계나 시공에 반영하게 된다. 터널발파 중 소음의 영향은 높지 않은 것으로 나타나 본 논문에서는 진동에 대한 특성만을 고려하였다.

3. 자료 획득

본 연구에 사용된 시추공 data는 문헌연구와 실 계측

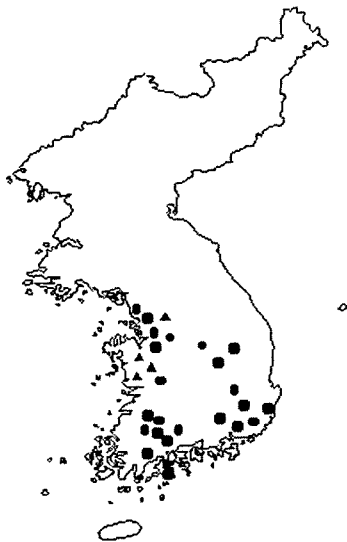


Fig. 1. Blasting and measuring sites

을 통하여 획득하였다. 시추공발파 data는 이미 설계에 사용된 보고서를 통해 18개 site에서 458개의 data, 실 계측을 통해 5개 site로부터 120개의 data를 획득하였다. 일반터널발파 자료는 4개 site에서 221개 data를 계측하여 분석에 이용하였다. 또한, 1개 site에서 실 계측한 8개의 시추공발파 진동 data와 8개의 누두공발파 data를 분석에 포함 시켰다. Fig. 1은 자료가 획득된 위치를 지도상에 표시한 것인데 ● 표시지역이 시추공발파 지역이고 ▲ 표시지역은 일반터널발파 지역이다. Fig. 1에 나타난 것처럼 계측지역은 전국에 걸쳐 분포한다.

실 계측된 시추공발파와 일반 터널발파에서 보다 정확한 진동data를 얻기 위하여 동일한 계측장비가 사용되었다. 사용된 계측장비는 캐나다 InstanTel社의 Blastmate Series II인 DS477과 DS677, Blastmate Series III인 DS077, Blastmate Plus 등이다. 본 연구의 문헌을 통해 수집된 나머지 진동 data 대부분이 이와 같거나 비슷한 종류의 계측장비로부터 측정된 것이다.

4. 진동특성 비교분석

Table 1은 획득된 data를 이용하여 각 site 별 입지상수를 구한 것이다. 여기서 환산거리(SD, Scaled distance)는 자승근($m/kg^{1/2}$) 또는 입방근($m/kg^{1/3}$)의 두 가지로 계산하였으며 표에서 K0와 K1은 50%와 95%의 신뢰구간을 갖는 발파진동상수이고 n은 감쇠지수, r은 상관계수이다.

Table 1에서 시추공발파와 일반 터널발파의 진동전달 특성을 살펴보면 조사대상 전체에서는 삼승근환산거리의 상관계수가 자승근보다 0.01~0.02정도 높게 나타났다. 개별 계측의 경우 12개 site에서 자승근환산거리의 상관계수가, 5개 site에서 삼승근환산거리의 상관계수가 높았는데 그 차이는 근소하였다. 따라서 본 연구에서는 장약량, 거리 및 지반 조건의 변화가 클 때 적용성이 높은 것으로 알려진 자승근환산거리를 중심으로 비교 분석을 하였다. 입지상수 K는 안전율과 경제성을 고려하여 설계에 적용하고 있는 95%의 신뢰구간 K1을 대상으로 분석하였다.

Table 1에 나타나듯이 입지상수 K와 감쇠지수 n의 경우 site 별로 분산이 심하다. 이는 발파작업조건과 지반조건에 기인한 것으로 판단된다. 전체 site의 K1값은 시추공 발파의 경우 7130mm/s로 일반터널발파의 2510mm/s보다 3배가량 높고 Dowding 제안식(Dowding, 1985)의 2330mm/s와는 더 큰 차이를 보였다. 시추공발파 진동식

Table 1. Site factors of blasting sites

Section	Sites	*No.	Square root scaled distance				Cubic root scaled distance			
			r	K_0	K_1	n	r	K_0	K_1	n
borehole blasting	A	21	0.89	75	133	-0.88	0.89	84	148	-0.86
	B	14	0.94	122	196	-1.06	0.95	170	267	-1.08
	C	18	0.88	1110	2300	-1.47	0.86	1360	2910	-1.46
	D	43	0.86	599	1730	-1.47	0.87	919	2550	-1.56
	E	24	0.92	7250	12700	-2.00	0.90	5800	11100	-1.96
	F	16	0.77	45200	69500	-2.15	0.49	2660	4790	-1.39
	G	16	0.97	1250	1780	-1.55	0.97	1280	1820	-1.56
	H	34	0.89	4410	9420	-1.80	0.88	4510	9840	-1.82
	I	28	0.57	2110	7650	-1.47	0.57	1780	6450	-1.47
	J	24	0.93	37800	74100	-2.76	0.93	21700	42600	-2.76
	K	7	0.97	1120	1860	-1.60	0.97	1120	1870	-1.60
	L	16	0.93	1200	2050	-1.58	0.91	974	1850	-1.49
	M	12	0.97	2050	2930	-1.63	0.97	2730	3740	-1.69
	N	76	0.72	476	1840	-1.44	0.72	505	1940	-1.44
	O	38	0.94	4380	9030	-1.80	0.94	4710	9920	-1.83
	P	16	0.93	239	369	-1.68	0.95	239	352	-1.71
	Q	45	0.83	7970	18600	-2.02	0.79	7320	18600	-1.99
	R	42	0.74	6170	19800	-2.17	0.72	4160	13800	-2.13
	S	31	0.93	28900	86700	-2.48	0.92	22900	74600	-2.46
	T	16	0.89	2790	7230	-1.82	0.89	2030	5200	-1.86
U	28	0.94	1660	3940	-1.71	0.94	1580	3700	-1.76	
V	12	0.70	1950	5690	-1.38	0.65	1000	3110	-1.23	
W	8	0.95	1380	2270	-1.80	0.95	1290	2130	-1.80	
Total	578	0.80	1880	7130	-1.66	0.81	2140	8060	-1.70	
tunnel blasting	a	77	0.75	226	632	-1.12	0.76	443	1210	-1.14
	b	36	0.87	3340	7403	-1.72	0.87	6960	15600	-1.75
	c	31	0.67	329	1483	-1.22	0.72	1370	5510	-1.48
	d	82	0.86	3440	9356	-1.85	0.86	7730	20900	-1.82
	Total	221	0.80	877	2510	-1.45	0.82	1900	5280	-1.49

*No : Number of measured point.

의 n 값은 -1.66으로 -1.45인 일반터널발파에 비해 다소 큰 값을 보였고, Dowding 제안식의 -1.46과 Devine 제안식(Devine, 1966)의 -1.54와 비교해도 큰 값을 나타내었

다. 이는 무자유면 상태의 시추공발파로 인한 진동이 1 자유면 이상의 일반터널발파에 비해 더 크게 발생하는 반면 감쇠가 빠르게 진행된다는 것을 의미한다.

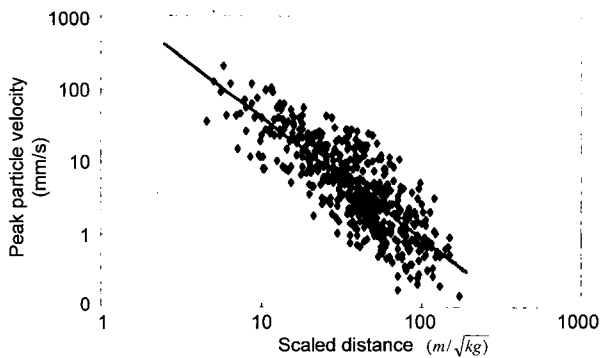


Fig. 2. Distribution of peak particle velocities for borehole blasting

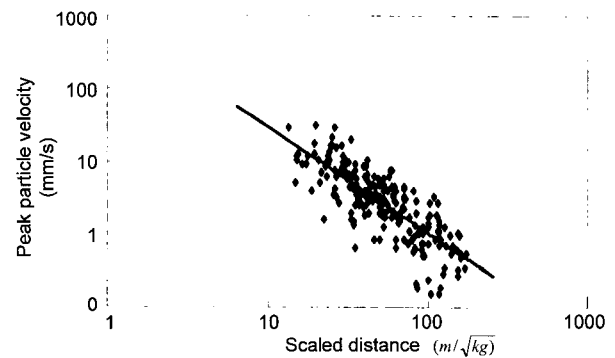


Fig. 3. Distribution of peak particle velocities for tunnel blasting

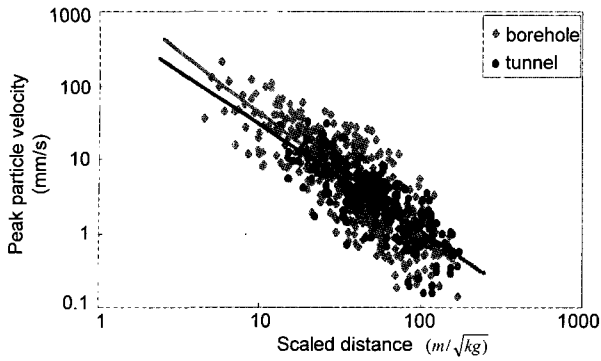


Fig. 4. Distribution of peak particle velocities from the borehole and tunnel blasting

Fig. 2와 Fig. 3은 시추공시험발파에 의한 진동 data와 일반터널발파를 통한 진동 data의 분포 특성을 파악하기 위해 환산거리와 진동속도와의 관계 그래프를 나타낸 것이다. Fig. 4는 이 두 자료를 단일 그래프에 표현하였는데 시추공발파의 최대 진동 속도가 SD 40 이하인 범위에서 터널발파의 진동속도보다 높고 SD가 60 이상인 범위에서는 낮음을 알 수 있다.

Fig. 5는 Fig. 4의 두 진동식과, Dowding이 제안한 터널 진동식을 비교하기 위해 하나의 그래프에 표현하였다. 참고로 Devine의 제안식은 입지상수 K값이 너무 작아 분석에 포함시키지 않았다. 일반터널 진동식의 경우 K값은 Dowding의 제안식보다 약간 크고 감쇠경향, 즉 n은 거의 유사한 경향을 보인다. 하지만 시추공시험발파 진동식의 경우 K와 n이 모두 높은 값을 나타내 국내의 일반터널발파 뿐만 아니라 Dowding의 제안식과도 차이를 나타냄을 알 수 있다.

다음은 시추공시험발파를 통해 예측한 진동식이 실제 설계에 사용될 경우 미치는 영향정도를 평가하기 위해 세 가지 제안식에 대한 LSD(Limit of scaled distances)를 비교하였다. Table 2는 위의 진동식들에 대한 LSD를 비교한 것이다.

Table 2을 토대로 허용진동속도가 주어졌을 때 거리별 장약량의 변화를 살펴보았다. Fig. 7은 이들 결과를

Table 2. Limit of scaled distances for 4 vibration Level

section	Site factors of 95% confidence		Limit of scaled distances(m/kg ^{1/2})			
	K1	n	3 mm/s	5 mm/s	10 mm/s	25 mm/s
borehole	7130	-1.66	109	80	53	35
tunnel	2510	-1.45	101	71	44	28
Dowding	2330	-1.46	93	65	41	25

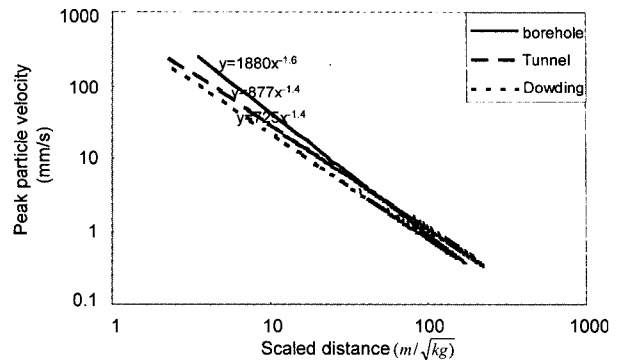


Fig. 5. Relations between scaled distance and peak particle velocity

그래프로 나타낸 것이다. 지금 설계에 사용되고 있는 3mm/s를 기준으로 볼 때 borehole, tunnel, Dowding 순으로 100m에서 허용장약량이 0.8, 1.0 1.2kg이었다. 이는 일반발파로는 터널의 굴착이 어렵고 정밀제어발파를 적용해야 한다고 볼 수 있다. 서울 지하철의 주택이나 아파트에 적용된 5mm/s의 진동허용치를 적용하였을 때 100m 거리에서의 허용장약량은 위와 같은 순서로 1.6, 2.0, 2.4kg으로 나타났다. 이처럼 제안된 진동식간의 최대허용 장약량이 큰 차이는 보이지 않았지만 설계에 영향을 미칠 정도였다. 상가건물에 적용되었던 10mm/s에서는 borehole, tunnel, Dowding 순으로 그 허용장약량이 3.6, 5.2 5.9kg으로 나타났고 철근콘크리트 빌딩 및 공장에 적용된 10~40mm/s, 본 연구에서는 25mm/s를 기준으로 분석하였는데 역시 같은 순서를 보였고 허용장약량이 8.2, 12.8, 16.0kg으로 산출되었다. 이 결과에서 보듯이 일반터널발파로부터 예측한 진동식보다 시추공시험발파로부터 예측한 진동식이 최대허용장약량을 기준으로 볼 때 다소 보수적인 평가가 됨을 알 수 있다.

5. 시추공발파와 누두공발파

시추공발파와 누두공발파를 통해 예측된 진동식을 비교하기 위해 한 지역을 선정하여 같은 시추공 내에서 두 차례의 시험을 하였다. 여기서 누두공발파는 최소화항선과 누두공 반경으로부터 누두지수를 구하기 위한 본래의 의미로 사용된 것이 아니라 1자유면 상태에서의 진동전달 특성을 파악하기 위해 선정된 방법이다. 시험대상지역은 지표면까지 암반층으로 구성되어 있었으며 발파는 각각 1회 실시하였다. 계측기의 배열은 환산거리가 10~100의 범위가 되도록 하였고 그래프에서 SD

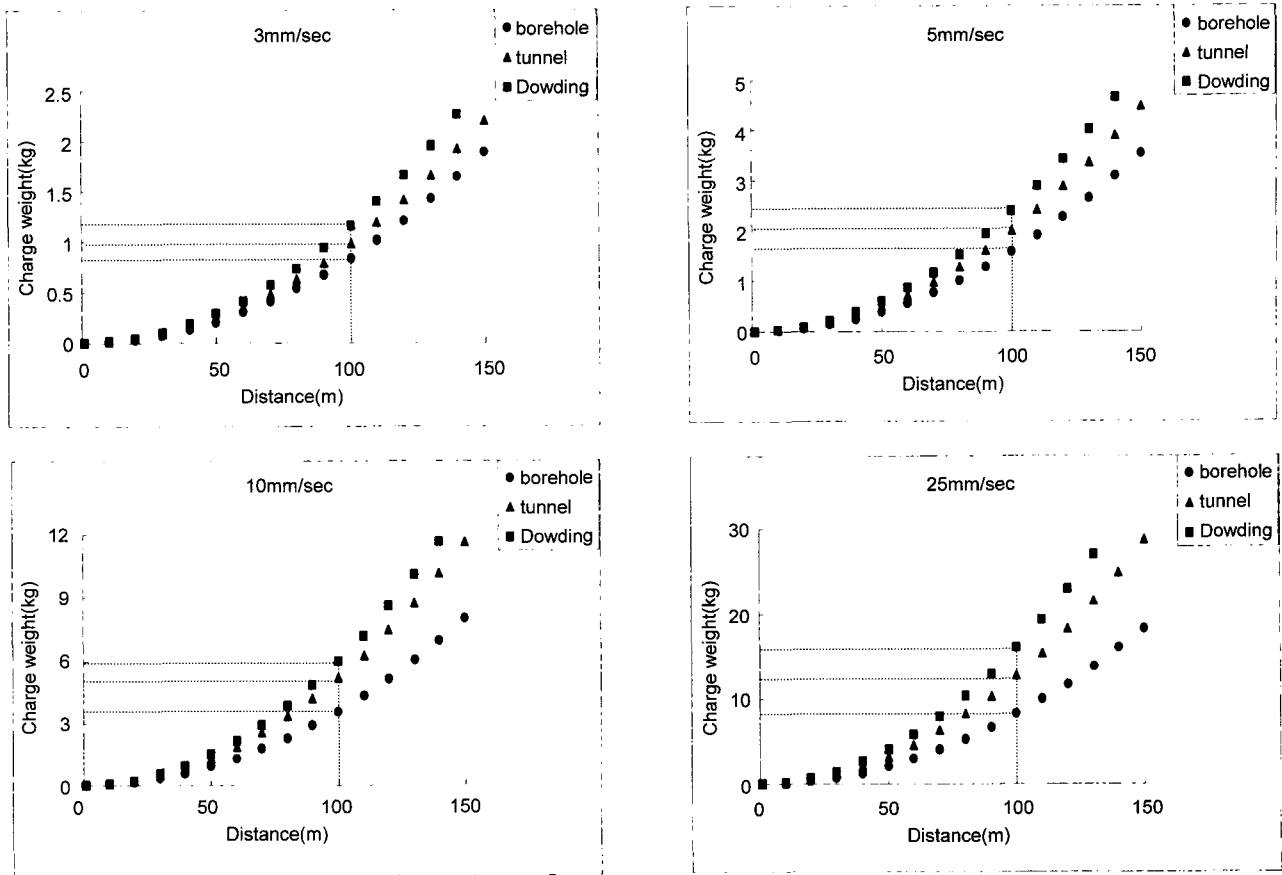


Fig. 6. Critical charge weight versus distance

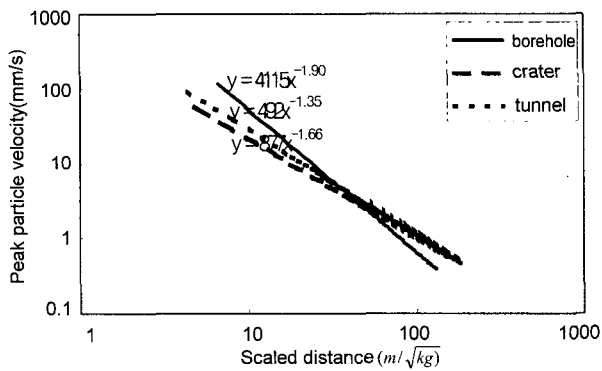


Fig. 7. Relations between scaled distance and peak particle velocity

10 이하와 100 이상의 범위에서는 산출된 진동 예상식으로 부터 외삽 하였다.

Fig. 7은 시추공과 누두공, 그리고 일반터널발파의 진동특성을 비교한 그래프이다. 시추공과 누두공식은 동일 시추공발파를 통해 얻은 결과이고, 터널식은 Fig. 3의 일반터널발파 진동전달식을 나타내었다. 명확한 비교를 위해 그래프에서 data는 숨기고 50%의 평균선을 나타내었다.

95% 신뢰구간의 입지상수 K1은 borehole, tunnel, crater 순으로 5990, 2510, 740으로 나타났으며 감쇠지수 n은 -1.90, -1.66, -1.35으로 역시 같은 순서를 보였다. 이 결과로부터 시추공발파는 일반적인 터널발파보다 진동은 크게 발생하고 감쇠가 빨리 일어난다는 것을 재차 확인할 수 있었다. 또한 지표발파의 특성을 지나는 1차 유면 누두공발파는 시추공발파에 비해 일반터널발파의 진동전달 특성에 좀더 부합하나 역시 K와 n값에 다소간 차이를 나타냄을 알 수 있었다.

6. 시추공발파 진동 주파수 특성

시추공발파의 진동 주파수 특성을 일반터널발파의 진동 주파수 특성과 비교하기 위해 각각의 시간이력 과 FFT(Fast Fourier Transform) 분석을 통한 주진동수를 산정하였다. Fig. 8과 Fig. 9는 효과적인 비교분석을 위해 각각의 측정된 값들 중 SD가 30~35인 진동치의 분석 결과를 나타낸 것이다. 물론 한 개의 진동치 분석을 통해 일반화하기는 어렵지만 진동파형, 주파수특성, 지발단차 등 각각의 진동특성을 잘 설명하고 있다. 순발발

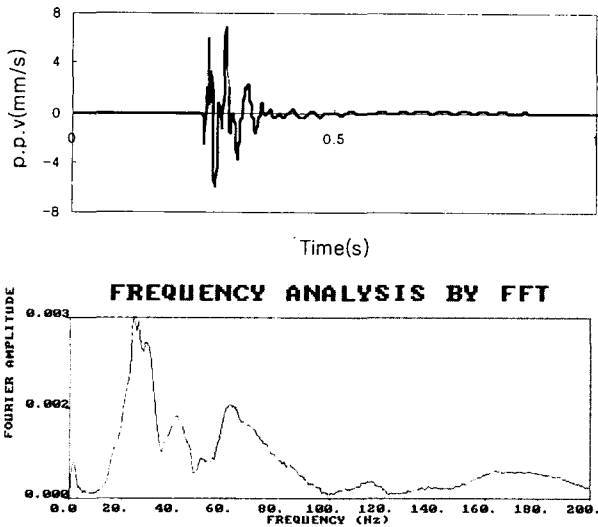


Fig. 8. Wave form and frequency distribution of borehole blasting

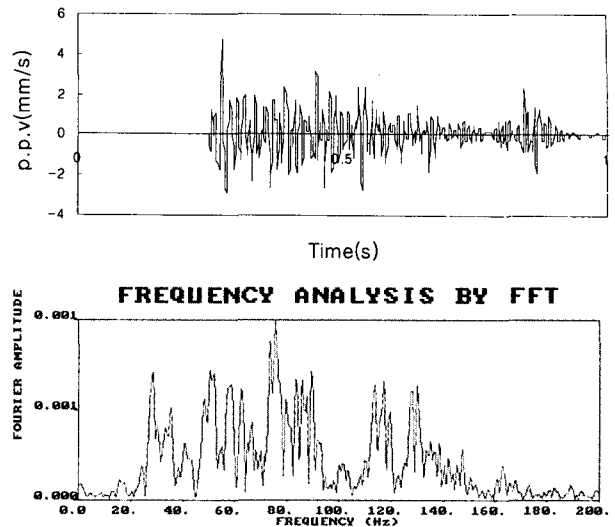


Fig. 9. Wave form and frequency distribution of tunnel blasting

파인 시추공발파의 경우 주진동수가 약 30Hz 이고 지발 발파인 터널발파의 경우 주진동수가 약 80Hz로 시추공 발파보다 고주파수의 진동이 우세한 것으로 나타났다.

Fig. 10은 본 논문에 언급된 시추공발파와 일반터널 발파의 모든 data의 주파수를 분석하여 상호 비교한 그래프이다. 시추공 발파 data의 주파수 분석결과 진동수가 30~60Hz에서 우세함을 나타낸 반면 일반 터널발파의 경우 주진동수의 범위가 60~90Hz 였다. 일반터널발파의 결과는 건설발파의 경우 50~100Hz의 주진동수를 나타낸다는 Dowding의 결과와 거의 일치하고 있으나 시추공발파는 주진동수가 현저히 낮은 것을 알 수 있다. 또한 누두공 발파 진동 data 주파수 분석결과 주진동수가 대부분 20~30Hz 사이로 나타났다. 이는 지표발파의 주진동수가 5~30Hz를 보인다는 기존의 연구와 비교해 볼 때 누두공발파는 주파수 특성에 있어서 지표발파와 유사성을 갖는다는 사실을 알 수 있었다.

지금까지의 결과를 종합해 볼 때 시추공시험발파는

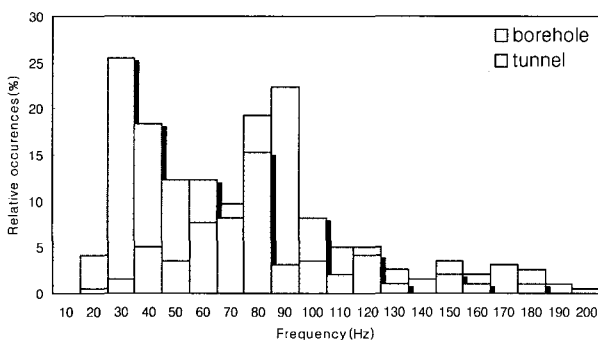


Fig. 10. Distribution of dominant frequencies

대상 지반의 진동전달 특성을 어느 정도 예측하는데 유용하다. 그러나 일반적인 시험발파와는 달리 무자유면 상태에서 발파가 이루어지므로 실제 터널을 굴착할 때 발생하는 진동의 전달 특성과는 차이가 있다. 따라서 이를 설계에 반영하는 데는 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.

7. 결론

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

- (1) 시추공 발파 전체 site에서 95% 신뢰구간의 입지상수 K1과 감쇠지수 n이 각각 7130과 -1.66으로 일반터널발파의 2510와 -1.45보다도 큰 값을 보였을 뿐만 아니라 Dowding과 Devine의 제안식보다도 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 진동상수에 비해 높게 나타났다. 1자유면 누두공발파의 진동상수들은 터널발파보다 낮았지만 시추공발파에 비해 터널발파의 진동전달 특성과 더 유사한 결과를 보였다.
- (4) 주파수 특성을 분석하기 위해 시간이력과 FFT분석을 통한 주진동수 산정 결과 시추공발파의 주진동수가 30~60Hz에서 우세함을 나타내 60~90Hz에서 우세함을 보인 일반터널발파의 주진동수에 비해 낮은 범위에 분포함을 알 수 있었다.
- (5) 시추공발파와 터널발파는 진동전달 특성이 현저히 다르므로 시추공시험발파 자료를 바로 터널발파 설계에 사용하는 것은 적절하지 못하며 통계적 처리와 함께 주의하여 설계해야 할 것으로 판단된다.

참 고 문 헌

1. 범진삼, 주재성, 양형식(1995), "진주 나동터널공사 지중발파의 진동특성", 한국자원공학회지, Vol.32, pp.350-356.
2. 서영춘, 양형식, 하태욱(2001), "터널발파의 진동 전달 특성에 관한 연구", 대한화약기술학회지, Vol.19.1, pp.41-51.
3. 양형식(1992), "지표발파의 진동특성에 관한 기초연구", 터널과 지하공간, 한국암반역학회지, Vol.2, pp.199-211.
4. Devine, J.R.(1996), "Avoiding Damage to Residences from Blasting Vibrations", Highway Research Record 135, Highway Research Board, National Research Council, National Academy of Sciences, pp.35-42.
5. Dowding, C.H.(1996), "Construction Vibrations", Prentice-hall, Upper Saddle River, NJ 17458, pp.81-92.
6. Dowding, C.H.(1985), "Blasting Vibration Monitoring and Control", Prentice Hall, Englewood Cliffs, pp.78-82.
7. Esteves, J. M.(1978), "Control of Vibration Caused by Blasting", Memoria 409, Laboratorio de Engenharia Civil, Ministerio da Habitacao e Obras Publicas, Lisbon, Portugal, pp.11-13.
8. Stagg, M.S. and A.J. Engler(1980), "Measurement of Blast Induced Ground Vibrations and Seismograph Calibrations", U.S.B.M. Report of investigation 8506. 1980.

(접수일자 2003. 8. 18, 심사완료일 2003. 10. 10)