

터널발파의 진동 전달 특성에 관한 연구

A Study on Vibration Propagation Characteristics in Tunnel Blasting

서 영춘, 양 형식, 하 태욱

Young-Chun Seo, Hyung-Sik Yang, Tae-Wook Ha

전남대학교 자원공학과

초 록

본 연구에서는 터널발파 진동의 전달 특성을 규명하기 위하여 네 곳의 도로터널의 '터널내부', '터널외부', '터널직상부 진행방향', '터널직상부 진행직각방향'의 네 방향으로 발파진동을 계측하였다. 지발당장약량을 해당 지발당장약량과 최대 지발당장약량으로 구분하였으며, 지반의 진동 전달 특성을 확인하기 위하여 자승근 환산거리와 입방근 환산거리로 회귀분석 하였다. 또한 PPV, 거리별 우세진동수를 구하였다.

터널상부 진행방향의 진동 수준이 가장 크게 나타났으며, 진동의 감쇠도 크게 이루어졌다. 터널내부는 비교적 고주파성분이 우세하였으나 나머지는 일반적인 경향을 보였다.

최대 지발당장약량을 적용한 입방근 환산거리의 경우가 거리별 감쇠특성 및 상관성이 다른 비교대상에 비하여 가장 우세하게 나타났다. 따라서 최대 지발당장약량을 적용한 입방근 환산거리 방식으로 설계하는 것이 바람직하다고 판단된다.

핵심어 : 터널발파, 발파진동, 지발당장약량, 환산거리, 회귀분석

1. 서 론

발파진동에 영향을 미치는 요인으로서는 먼저 발파부지와 인근 구조물의 기하학적 형태, 대상암반의 지질학적 특성 및 역학적 성질을 의미하는 입지조건과 사용하는 폭약의 종류, 장약량, 기폭방법, 전색상태, 자유면의 수, 발파유형, 폭발원과 측정간의 거리를 의미하는 발파조건의 변화를 들 수 있다. 발파진동을

미연에 방지하기 위해서는 가능한 한 시험발파시 본 발파와 동일한 조건을 반영하는 것이 필요하다. 그러나 실제로 입지조건이나 발파조건을 모두 반영하는 것은 불가능한 일이므로 조건 변화에 대한 예측식의 변화를 사전에 어느 정도 예측하는 것이 필요하며, 본 발파시의 계측을 통하여 보정하는 것이 중요하다. 또한, 시험발파를 통한 발파진동수준의 예측을 위하여 발파 진동식에서 사용되는 상

수들을 결정하여야 하지만 시간과 비용이 많이 소요된다는 단점 때문에 대부분의 터널현장의 경우 발파 진동에 대한 고려를 하지 않은 발파패턴도로 시공하고 있는 실정이다.

일반 노천발파와 구별되는 터널발파는 자유면의 수가 대부분 1 자유면으로 한정되어 이루어지는 극히 제한적인 발파공법이다. 그러므로 자유면의 확장을 유도하는 심빼기 발파가 본 발파의 성패를 좌우하는 가장 큰 요인이다. 이러한 이유 때문에 현장의 시공관계자는 필연적으로 암반을 파쇄하기에 충분한 화약량보다 훨씬 많은 양의 화약을 이용하여 발파를 행하게 된다. 이렇게 필요 이상으로 과장약된 화약은 과도한 진동을 유발하게 된다.(한국토지공사, 1993)

현재까지 국내에서 연구 발표된 논문은 진동의 크기에 따른 지상구조물의 거동, 주파수 영역에 따른 허용진동치의 규제 및 환산거리와 관련된 것이 대부분이며 아직까지 방향성에 따른 진동의 전달특성 및 적용성에 관한 연구는 미비한 실정이다. 따라서 본 연구에서는 발파진동중에서 터널발파만의 진동 전달특성을 규명하여 적정 진동추정식을 유도하여 본 발파에 적용함으로써 보다 안전하고 경제적인 시공을 하고자 하며, 동시에 진동을 제어하여 민원 발생의 소지를 미연에 제거하고자 한다. 특히, 진동발생원인 터널의 시공기점을 기준으로 '터널내부', '터널외부', '터널직상부 진행방향', '터널직상부 진행직각방향'의 네 곳을 집중 비교대상으로 하여 방향성에 따른 진동의 전달 특성 시험을 실시하였다.(양형식, 1999)

계측현장 및 계측위치별 적정 진동식을 추정하기 위하여 발파진동식에 가장 크게 영향을 미치는 지발당장약량을 최대진동을 유발한 시간에서 사용된 지발당장약량을 기준하는 해당 지발당장약량과 본 발파시 사용된

지발당장약량을 의미하는 최대 지발당장약량으로 각각 구분하여, 자송근 환산거리와 입방근 환산거리를 회귀분석을 통하여 신뢰구간 50%와 95%에서 비교·분석을 실시하고자 한다. 또한, 발파진동의 특성상 입자 최대진동속도에 대한 평가도 중요하지만 주진동수를 고려한 진동수준의 평가도 매우 중요하다. 최근에는 주파수 대역을 고려한 진동속도를 규제기준으로 설정하는 경향이 높아지고 있기 때문에 발파조건 및 입지조건 그리고 계측위치의 변화에 따른 주파수 대역의 영향을 확인하기 위하여 주진동수와 PPV(peak particle velocity) 및 거리를 상호 비교하고자 한다. 이로써 발파진동의 계측위치의 변화에 따른 우세 주파수 대역을 규명하고자 한다.

2. 시험발파 개요

시험발파가 수행된 현장은 전국 3개 지역의 4개 터널발파 현장으로 본 연구에서는 발파현장별 구분을 편의상 Site I, Site II, Site III, Site IV로 구분하였다.

2.1 현장개요

시험발파가 실시된 터널현장은 일반국도 및 고속도로 4개 현장으로 터널의 총 연장, 터널의 형상(폭×높이), 발파공법, 지보패턴 등을 살펴보면 표 1과 같다.

표. 1 시험발파 현장 개요

Site	연장 (m)	형상 (폭×높이)	발파공법	지보 패턴	비고
Site I	2,620	11.60×8.03	전단면	I~II	편도 2차선 국도
Site II	1,220	7.48×8.15	상부 반단면	IV~V	편도 2차선 고속도로
Site III	830	7.48×8.15	상부 반단면	I~II	편도 2차선 고속도로
Site IV	1,500	11.65×7.68	전단면	I~II	편도 2차선 국도

2.2 시험발파 현장 위치

본 연구를 위하여 시험발파를 실시한 현장의 지역적인 특징은 국도 우회도로와 고속도로의 터널구간으로 시험발파 현장이 비교적 시가지와 인접한 지역에 위치하고 있었다. 본 연구를 위하여 시험발파를 실시한 터널현장의 행정구역상 위치는 그림 1~그림 3과 같다.

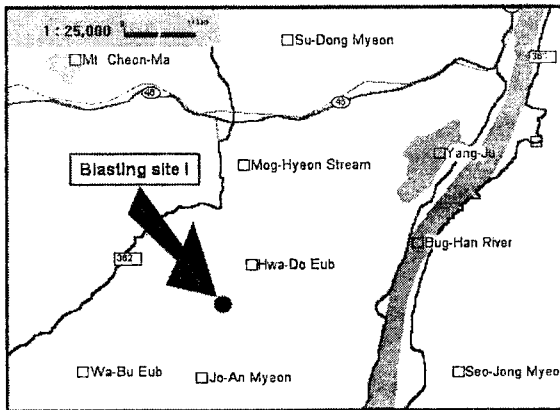


그림 1. 시험발파 위치 : Site I

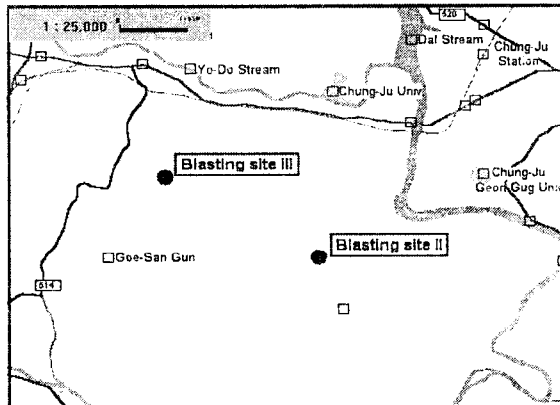


그림 2. 시험발파 위치 : Site II, III

2.3 지질특성

시험발파를 실시한 각 Site별 지질적인 특징을 개략적으로 살펴보면 표 2와 같다.

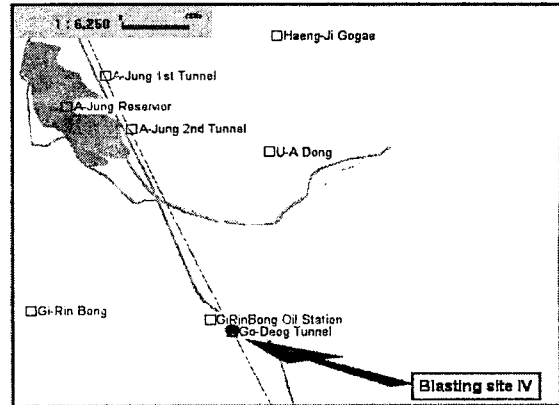


그림 3. 시험발파 위치 : Site IV

시험발파 현장의 주된 지질상 구조를 살펴보면 site I은 주로 호상 편마암의 구조를 보이며, site II 및 Site III는 흑운모-석영 편마암의 주된 구조로 형성되었다. 또한, site IV는 석영 반암의 주된 구조를 이루고 있는 것으로 확인되었다.

표 2. 시험발파현장의 지질특성

Site	지질특성
Site I	<ul style="list-style-type: none"> Amphibolite, 천매암, 화강암, 편마암 표토 및 풍화대층의 하부에 편마암, 화강암
Site II	<ul style="list-style-type: none"> 시대미상의 계명신층 옥천계 문주리층 흑운모 화강암이 기반암으로 분포 중점부의 주절리 방향은 N68~84° W
Site III	<ul style="list-style-type: none"> 편마암, 석회암과 후기 관입암체인 화강암이 기반암으로 분포 장기간의 삭박작용(Degradation)의 결과 화강암체의 전암이 노출 전지역에 걸쳐 적, 자철석을 함유하고 있으며, 자철석이 우세 편리의 주향 및 경사는 N70~80° E 중점부의 절리방향은 N8~12° E, 17~54° SE 절리의 주향은 NS이고, 경사각은 18° W로 터널의 방향과 수평
Site IV	<ul style="list-style-type: none"> 전기탐사의 결과 시점부 : 표토 2.0m, 풍화암 1.8m, 연암 5.4m, 경암 9.2m로 분포 중점부 : 표토 1.5m, 풍화암 3.0m, 연암 10.0m, 경암 15.0m로 분포

2.4 암반물성

시험발파를 실시한 각 현장의 암반 물성을 개략적으로 살펴보면 표 3과 같다.

표 3. 암반물성

Site	암반물성
Site I	<ul style="list-style-type: none"> 연암층의 T.C.R은 0~100%이고, R.Q.D는 0~35% 경암층의 T.C.R은 0~100%이고, R.Q.D는 0~86% 부분적으로 분포하는 파쇄대와 절리구간을 제외하면 보통 상태의 암질
Site II	<ul style="list-style-type: none"> 연암층의 T.C.R은 60~80%이며, R.Q.D는 0~27% 경암층의 T.C.R은 100%이며, R.Q.D는 10~100% 탄성과속도 분포는 상부층은 0.42~0.83km/sec 중간층은 1.11~1.80km/sec 하부층은 2.27~3.3km/sec
Site III	<ul style="list-style-type: none"> 연암층의 T.C.R은 50~100%, R.Q.D는 10~27% 전반적인 T.C.R은 50~100%, R.Q.D는 0~97%
Site IV	<ul style="list-style-type: none"> 시점부 및 종점부에서 RQD의 값이 가장 적게 나타나며, 터널의 중간지점에서 큼

3. 진동계측 및 시험방법

3.1 진동계측 장비

터널 발파현장에서 진동측정하기 위하여 사용된 계측 장비로는 캐나다 Instantel 社의 Blastmate DS677 1대와 Blastmate DS077 5대를 사용하였다. 특히, 사진 1은 터널내부에서 진동을 계측하기 위하여 터널내부의 지반에 시멘트 모르타르를 타설 후 앵커를 이용하여 계측을 실시하고자하는 지반에 고정된 후

의 상태를 보여주고 있다.

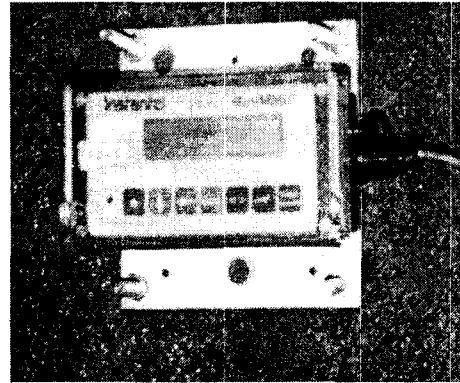


사진 1. 터널내부에서 계측기의 부착

3.2 시험발파

3.2.1 시험발파 계측 DATA

본 연구를 위하여 총 3회에 걸쳐 전국의 4개 일반국도 및 고속도로 터널현장에서 시험을 실시하였다. 발파진동 DATA를 계측을 실시한 위치를 기준으로 하여 정리한 각 Site별 및 계측위치별 진동계측의 결과는 표 4와 같다.

표 4. 계측현장별 및 계측위치별 진동측정 결과

Site	발파 횟수	내부	외부	상부진행	상부진행 직각	Total
Site I	19회	24	19	-	39	82
Site II	8회	-	16	-	20	36
Site III	17회	39	41	-	-	80
Site IV	7회	-	11	15	-	26

시험발파를 실시한 각각의 터널현장마다 서로 다른 공정상의 여건으로 인하여 발파진동의 계측을 주 계측위치인 '터널내부', '터널외

부', '터널직상부 진행방향', '터널직상부 진행
직각방향'에서 모두 실시하지는 못하였다. 그
러나 각 현장마다 중점적인 비교대상 네 가지
중에서 두 가지 이상을 실시하였다.

3.2.2 발파조건

발파패턴 및 터널형상이 조금씩 다르기 때문
에 그에 따른 발파조건이 조금씩 차이를 보이
고 있다. 이 발파조건은 일반적으로 천공방법,
지발당장약량, 최소저항선, 폭약의 종류, 공간
격, 전색, 사용뇌관 등을 들 수 있으며, 시험발
파를 실시한 각각의 현장별 발파조건은 표 5
와 같다.

표 5. 계측현장별 발파조건

Site		Site I	Site II	Site III	Site IV
발파조건					
공경(mm)		45	45	45	45
천공장(m)		3.0~3.5	1.5~2.5	3.3~3.8	3.3~3.5
공수		147~158	125~130	120~135	109~115
공간격(m)		0.6~1	0.6~0.9	0.6~1.2	0.6~1
사용 폭약		Himite Newmite FINEX I II	Himite FINEX I II	Emulite FINEX I II	Himite FINEX I II
약경 (mm)		32, 17	32, 17	32, 17	32, 17
공당 장약량 (kg)	심발 공	2.25	1.875	2.625	2.25
	주변 공	1.875	1.125	1.875~ 2.25	1.5~ 1.875
지발당 장약량 (kg)		15~22.5	6.7~11	15~21	9~13.5
총 장약량 (kg)		242.5~ 260	114~125	229.5~ 273	197~225

3.3 심뺨기공법

터널발파의 성패를 좌우하는 심뺨패턴의 선
정은 터널발파 시공의 전단계에 걸쳐서 중요
한 영향을 미친다. 그러므로 현장상황에 적합
한 적정 심뺨패턴의 결정은 매우 중요한 사항
이다.

국내 터널시공에서 주로 사용되는 대표적인
심뺨기 발파공법으로는 다음과 같이 세 가지
로 요약할 수 있다. 첫 번째로 막장면에 60~
70°의 경사로 천공하는 V-cut공법, 두 번째
로 막장면에 수직하여 천공하는 BURN-cut
공법, 세 번째로 위의 V-cut과 BURN-cut을
조합하여 자유면 형성을 용이하게 하는
SUPEX-cut이 대표적이다. 본 연구에서는 현
장마다 세가지 공법을 고루 적용하였다.

3.4 계측위치 선정

그림 4는 현장에서 진동 계측을 실시한 위
치를 도시한 그림으로 A, B, C, D, E는 터널내
부 및 터널외부에서 계측을 실시한 것을 나타
내는 것이며, 다음으로 I, II, III, IV, V는 터널
직상부 진행직각방향에서 계측을 실시한 것을
나타내고 있다. 마찬가지로 터널직상부 진행
방향에서 계측을 실시한 것은 1, 2, 3, 4, 5를
의미한다.

계측은 발파지점을 기준으로 하여 실시하였
고, 거리는 직선거리를 의미한다. 터널 전방의
내부 및 외부는 50 m 줄자를 이용하여 직선거
리를 측정하였으며, 터널직상부의 진행방향
및 진행직각방향은 발파위치를 기준으로 등고
선을 이용하여 직선거리를 계산하였다.

계측기의 간격은 SD 20, 30, 50, 100, 150을
기준으로 배열하였으며, 수시로 환산거리의
분포를 변화시켰으며 이를 바탕으로 계측기의
위치를 이동하면서 지반의 진동을 계측하였
다. 또한 현장의 여건에 따라서 환산거리의 분

포를 기준으로 하지 않고 단순히 거리를 기준으로 하여 50 m, 100 m, 150 m, 250 m, 400 m를 기준으로 각각 5대의 계측기를 배열하였다.

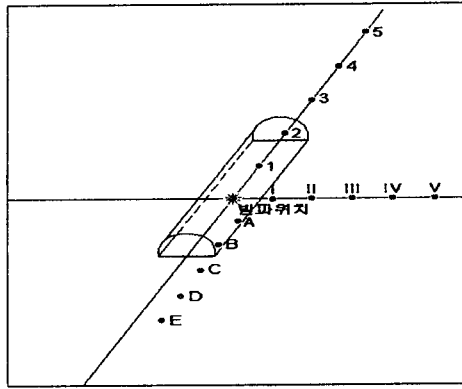


그림 4. 계측위치

4. 결과 및 고찰

터널발파시 지반진동의 전달 특성을 규명하기 위하여 시험발파를 실시한 계측현장별 및 계측위치별로 진동속도식에 가장 크게 영향을 미치는 지발당장약량을 최대진동이 계측된 시간에서 사용된 지발당장약량을 의미하는 해당 지발당장약량(matching charge per delay)과 본 발파시 적용된 최대 지발당장약량(maximum charge per delay)으로 각각 구분하여 신뢰수

준 50% 및 95%에서 회귀분석을 실시하여 비교대상의 상관성 및 거리별 감쇠특성을 비교하였다.

4.1 계측현장별 지반진동의 전달 특성

표 6~표 9는 신뢰수준 50% 및 95%에서 상관계수와 입자진동속도식을 계측현장별로 비교·분석한 결과를 나타낸 것이다.

시험발파를 실시한 각 현장의 암반특성, 지질 특성 및 발파조건이 어느 정도 차이는 있으나 각 현장별로 감쇠특성 및 상관성을 회귀분석을 통하여 비교대상을 상호 분석한 결과 시험발파를 실시한 모든 현장에서 최대 지발당장약량을 적용한 입방근 환산거리에서 거리의 변화에 따른 감쇠가 가장 크게 나타났으며, 해당장약량을 사용한 자승근 환산거리에서 가장 작게 나타났다.

신뢰수준 50% 및 95%로 회귀분석 후 상관성의 비교는 최대 장약량을 적용한 입방근 환산거리에서 0.70~0.86으로 가장 높았으며, 해당장약량을 적용한 자승근 환산거리에서 0.60~0.75로 가장 낮게 나타났다.

표 6. 자승근환산거리와 PVS의 비교 : 해당장약량

계측현장	DATA 수	r	자승근 환산거리	
			50%	95%
Site I	82	0.61	$v = 47 (D/W^{1/2})^{-1.21}$	$v = 310 (D/W^{1/2})^{-1.21}$
Site II	36	0.75	$v = 130 (D/W^{1/2})^{-1.38}$	$v = 510 (D/W^{1/2})^{-1.38}$
Site III	80	0.74	$v = 18 (D/W^{1/2})^{-0.99}$	$v = 58 (D/W^{1/2})^{-0.99}$
Site IV	26	0.60	$v = 21 (D/W^{1/2})^{-1.11}$	$v = 160 (D/W^{1/2})^{-1.11}$

표 7. 자승근 환산거리와 PVS의 비교 : 최대장약량

계측현장	DATA 수	r	자승근 환산거리	
			50%	95%
Site I	82	0.86	$v = 350 (D/W^{1/2})^{-1.86}$	$v = 1200 (D/W^{1/2})^{-1.86}$
Site II	36	0.87	$v = 250 (D/W^{1/2})^{-1.63}$	$v = 680 (D/W^{1/2})^{-1.63}$
Site III	80	0.78	$v = 30 (D/W^{1/2})^{-1.67}$	$v = 93 (D/W^{1/2})^{-1.67}$
Site IV	26	0.82	$v = 190 (D/W^{1/2})^{-1.94}$	$v = 1050 (D/W^{1/2})^{-1.94}$

표 8. 입방근 환산거리와 PVS의 비교 : 해당장약량

계측현장	DATA 수	r	입방근 환산거리	
			50%	95%
Site I	82	0.74	$v = 430 (D/W^{1/3})^{-1.60}$	$v = 2240 (D/W^{1/3})^{-1.60}$
Site II	36	0.82	$v = 580 (D/W^{1/3})^{-1.64}$	$v = 1860 (D/W^{1/3})^{-1.64}$
Site III	80	0.78	$v = 42 (D/W^{1/3})^{-1.10}$	$v = 135 (D/W^{1/3})^{-1.10}$
Site IV	26	0.68	$v = 98 (D/W^{1/3})^{-1.40}$	$v = 680 (D/W^{1/3})^{-1.40}$

표 9. 입방근 환산거리와 PVS의 비교 : 최대장약량

계측현장	DATA 수	r	입방근 환산거리	
			50%	95%
Site I	82	0.86	$v = 780 (D/W^{1/3})^{-1.83}$	$v = 2690 (D/W^{1/3})^{-1.83}$
Site II	36	0.70	$v = 513 (D/W^{1/3})^{-1.66}$	$v = 1380 (D/W^{1/3})^{-1.66}$
Site III	80	0.80	$v = 58 (D/W^{1/3})^{-1.19}$	$v = 180 (D/W^{1/3})^{-1.19}$
Site IV	26	0.82	$v = 460 (D/W^{1/3})^{-1.97}$	$v = 2570 (D/W^{1/3})^{-1.97}$

4.2 계측위치별 지반진동의 전달 특성

표 10~표 13은 계측현장 전체를 기준으로 '터널내부'에서 63개, '터널외부'에서 87개, '터널직상부 진행방향'에서 15개, '터널직상부 진행직각방향'에서 59를 획득하여 총 224개의 DATA를 기준으로 해당장약량 자승근 환산거리 및 입방근 환산거리 그리고 최대장약량 자승근 환산거리 및 입방근 환산거리를 계측현장별 비교와 마찬가지로 회귀분석을 통한 신뢰수준 50% 및 95%에서 상관성 및 감쇠특성을 분석한 결과이다.

계측위치별 진동 수준은 일정거리에서 '터널직상부 진행방향', '터널직상부 진행 직각방향', '터널내부', '터널외부'의 순으로 '터널직상부 진행방향'에서 가장 컸으며 '터널외부'에서 가장 낮은 수준으로 나타났다. 진동의 감쇠는 '터널직상부 진행방향'에서 크게 나타났으며, '터널직상부 진행직각방향'에서 가장 둔감하에 나타났다. 또한, '터널외부'와 '터널내부'에서는 큰 차이를 보이지 않았다

계측위치별 상관성의 분포는 최대장약량을 적용한 입방근 환산거리에서 0.63~0.78로 가장 우세하게 나타났으며, 0.51~0.62의 상관성을 보인 해당장약량을 적용한 자승근 환산거리에서 가장 낮게 나타났다. 또한, 최대장약량을 적용한 자승근 환산거리와 해당장약량을 적용한 입방근 환산거리는 0.60~0.73의 상관성을 보였다.

4.3 주파수 특성

시험발파 계측을 위하여 사용한 계측기기의 특성상 계측 범위의 제약으로 인하여 계측된 주파수를 100 Hz 이상의 범위는 모두 100 Hz로 간주하였으며, 10~100Hz의 범위에서 PPV, 거리의 변화에 따른 진동주파수는 특별한 경향을 보이지 않았다. 계측위치별로 주진동수, PPV 및 거리를 비교 대상으로 분석을 실시한 결과 비교적 근거리에서 위치한 '터널내부'에서 계측된 DATA는 접선성분, 수직성분, 진행성분의 세 성분 모두가 100 Hz 이상의 고주파성분이 우세하였다.

표 10. 자승근환산거리와 PVS의 비교 : 해당장약량

계측방향	DATA 수	r	자승근 환산거리	
			50%	95%
내부	63	0.62	$v = 17 (D/W^{1/2})^{-0.97}$	$v = 47 (D/W^{1/2})^{-0.97}$
외부	87	0.51	$v = 13 (D/W^{1/2})^{-1.0}$	$v = 93 (D/W^{1/2})^{-1.0}$
상부진행	15	0.55	$v = 44 (D/W^{1/2})^{-1.26}$	$v = 631 (D/W^{1/2})^{-1.26}$
상부진행직각	59	0.53	$v = 6 (D/W^{1/2})^{-0.584}$	$v = 18 (D/W^{1/2})^{-0.584}$

표 11. 자승근 환산거리와 PVS의 비교 : 최대장약량

계측방향	DATA 수	r	자승근 환산거리	
			50%	95%
내부	63	0.71	$v = 186 (D/W^{1/2})^{-1.48}$	$v = 437 (D/W^{1/2})^{-1.48}$
외부	87	0.60	$v = 22 (D/W^{1/2})^{-1.17}$	$v = 120 (D/W^{1/2})^{-1.17}$
상부진행	15	0.78	$v = 220 (D/W^{1/2})^{-1.95}$	$v = 2290 (D/W^{1/2})^{-1.95}$
상부진행직각	59	0.71	$v = 28 (D/W^{1/2})^{-1.1}$	$v = 78 (D/W^{1/2})^{-1.1}$

표 12. 입방근 환산거리와 PVS의 비교 : 해당장약량

계측방향	DATA 수	r	입방근 환산거리	
			50%	95%
내부	63	0.67	$v = 65 (D/W^{1/3})^{-1.18}$	$v = 160 (D/W^{1/3})^{-1.18}$
외부	87	0.60	$v = 50 (D/W^{1/3})^{-1.18}$	$v = 300 (D/W^{1/3})^{-1.18}$
상부진행	15	0.64	$v = 220 (D/W^{1/3})^{-1.56}$	$v = 3020 (D/W^{1/3})^{-1.56}$
상부진행직각	59	0.62	$v = 18 (D/W^{1/3})^{-0.80}$	$v = 53 (D/W^{1/3})^{-0.80}$

표 13. 입방근 환산거리와 PVS의 비교 : 최대장약량

계측방향	DATA 수	r	입방근 환산거리	
			50%	95%
내부	63	0.73	$v = 190 (D/W^{1/3})^{-1.48}$	$v = 447 (D/W^{1/3})^{-1.48}$
외부	87	0.63	$v = 50 (D/W^{1/3})^{-1.18}$	$v = 260 (D/W^{1/3})^{-1.18}$
상부진행	15	0.78	$v = 550 (D/W^{1/3})^{-1.96}$	$v = 6050 (D/W^{1/3})^{-1.96}$
상부진행직각	59	0.73	$v = 54 (D/W^{1/3})^{-1.1}$	$v = 78 (D/W^{1/3})^{-1.1}$

거리의 분포가 광범위한 ‘터널외부’에서 계측된 DATA는 접선성분, 수직성분, 진행성분의 세 성분 모두가 40~100 Hz이상의 넓은 분포를 이루고 있으며, 대부분이 근거리에서는 고주파의 성분이, 원거리에서는 저주파의 성분이 우세한 것으로 나타났으며, 거리의 분포가 70~180 m로 비교적 근 거리에 해당하는 ‘터널 직상부 진행방향’에서는 40~80 Hz의 분포를 보이고 있으며, 41~80 Hz에서는 접선성분과 진행성분이 많이 나타났으며, 100 Hz 이상에서는 수직성분이 특히 우세하였다. 근거리 및 원거리로 분포한 ‘터널 직상부 진행직각방향’에서는 41~100 Hz이상으로 넓게 분포하였으며, 주진동수 41~60 Hz에서는 접선성분 및 진행성분이 우세하였고, 61~100 Hz이상에서는 수직성분이 우세하였다.

그림 5는 터널발파 진동을 계측위치별로 주진동수와 PPV를 비교한 것이며, 계측위치별로 주진동수와 거리를 비교한 것은 그림 6과 같다.

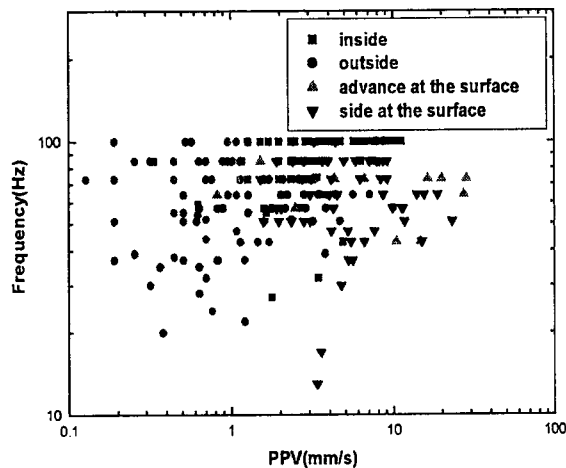


그림 5. PPV와 주진동수의 비교

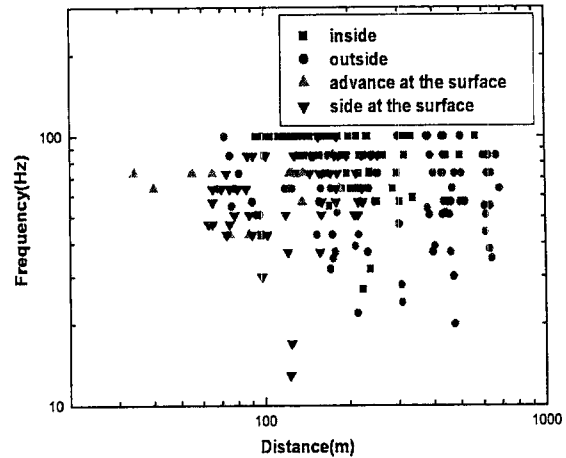


그림 6. 거리와 주진동수의 비교

5. 결론

본 연구는 터널발파의 위치별 진동의 전달 특성을 확인하기 위하여 수행하였으며, ‘터널 내부’, ‘터널외부’, ‘터널직상부 진행방향’, ‘터널 직상부 진행직각방향’에서 총 224개의 DATA를 기준으로 계측현장별 및 계측위별로 해당 장약량을 적용한 자승근 환산거리와 입방근 환산거리 및 최대장약량을 적용한 자승근 환산거리와 입방근 환산거리 그리고 주파수 특성을 비교·분석 후 다음과 같은 결론을 얻었다.

1) 계측위치별 진동 수준은 일정거리에서 ‘터널 직상부 진행방향’, ‘터널 직상부 진행 직각방향’, ‘터널내부’, ‘터널외부’의 순으로 ‘터널 직상부 진행방향’에서 가장 크고, ‘터널외부’에서 가장 낮은 수준으로 나타났다.

2) 진동 전달 특성은 최대장약량을 적용한 입방근 환산거리에서 감쇠 특성 및 상관성이 다른 비교대상에 비하여 우세하게 나타났다.

3) 비교적 근 거리에 위치한 터널내부에서 계

측된 DATA는 접선성분, 수직성분, 진행성분의 세 성분 모두가 100 Hz이상의 고주파성분이 우세하였으며, 거리의 분포가 광범위한 터널외부에서 계측된 DATA는 접선성분, 수직성분, 진행성분의 세 성분 모두가 40~100 Hz 이상의 넓은 분포를 이루었다. 따라서 근거리에서는 고주파의 성분이 우세하였고, 원거리에서는 저주파의 성분이 우세한 것으로 보아 기존의 연구와 유사하였다.

4) 진동 전달 특성 및 주파수 특성을 비교 대상으로 상호 비교·분석한 결과 현장 상황 및 발파조건이 어느 정도 차이가 있을 수 있으나 적정 환산거리를 추정하여 실제 시공에 이를 적용하기 위해서는 최대 지발당장약량을 적용하는 것이 바람직하며 또한, 자승근 환산거리의 적용보다는 입방근 환산거리를 적용하여 설계하는 것이 바람직 할 것으로 판단된다.

참 고 문 헌

1. 양형식, 1999, 개량 분착식 다단 발파공법 (SUPEX-cut)에 관한 보완 연구보고서, 105p.
2. 한국토지공사, 1993, 암발파 설계 기법에 관한 연구, pp. 254~275.