

1. 서 론

최근 지하철 건설이나 부지정지 등 도심지 개발 및 재개발이 활발해지면서 인구밀집 지역에서 화약발파가 불가피하게 되고 이로 인한 안전상의 문제로 많은 건설현장에서 민원이 야기되고 있다. 따라서 이러한 민원을 최소화하고 안전사고를 줄이기 위해서는 안전 정밀발파를 하는 것이 필수적이다. 그러나 발파효율상의 문제(경제성)를 동시에 고려해야 하기 때문에 발파진동 예측식에 의한 설계는 매우 중요하다 하겠다. 따라서 지금까지는 이에 대한 사례연구가 적어서 현장에서는 주먹구구식 경험에 의한 작업계획을 수립하여 발파작업을 시행해 오고 있다. 본 연구는 이와 같은 문제를 정량적으로 해결하기 위해 대구광역시 남구 대명동에 위치한 대덕문화 전당 신축공사를 위한 발파현장에서 224개의 발파진동측정자료를 수집하고 이에 의한 효과를 거리, 장약량 그리고 중간 매질과 측정점의 특성 등에 따라 분석하고, 나아가 더욱 효과적인 예측식 설계에 대한 제안을 하고자 한다.

2. 발파진동의 이론적 고찰

2.1 발파진동속도와 지발당장약량, 거리와의 관계

발파진동의 전파특성을 결정짓는 조건은 크게 입지조건과 발파조건으로 나눌 수 있다. 입지조건은 발파부지와 인근 구조물의 기하학적 형태, 대상암반의 지질학적 특성 및 물리적 성질 등을 말하고, 발파조건은 사용하는 폭약의 종류, 장약량, 기폭방법, 전색상태, 자유면의 수, 발파유형, 폭원으로부터 측정점까지의 거리 등이다. 이상의 요인들 모두가 발파진동의 크기와 전파특성에 상당한 영향을 미치지만 이들 중에서 암반중의 불연속면의 발달상황, 암반의 강도 등과 같은 탄성파의 전파와 관계가 깊은 지반의 지질특성, 지발처관의 사용으로 일정한 시간간격으로 분할폭파되는 지발당장약량과 폭원으로부터 측정지점

까지의 거리 등이 발파진동의 크기와 전파특성에 영향을 미치는 가장 중요한 요인이 된다. 한편 진동의 전파특성을 이론적으로 파악하려는 노력 많은 연구자들에 의해 계속되어왔다. 그러나 지반내의 불연속면과 지질적 구조의 복잡성으로 인하여 진동 전파에 관한 이론적 지반내의 불연속면과 지질적 구조의 복잡성으로 인하여 진동 전파에 관한 이론적인 접근에는 많은 어려움이 뒤따르게 되며 같은 압반에서도 현장의 발파조건 등에 따라 전파특성이 달라지므로 오히려 경험적인 연구가 더욱 중요하다 하겠다.

Hendron(1968), Devine(1966), Oriard(1980) 등 많은 연구자들은 발파현상에 관련된 변수의 차원해석을 근거로 하여, 많은 발파진동의 측정경험을 토대로 지상구조물의 피해의 척도가 되는 지반의 진동속도를 지발당장약량과 폭원으로 부터의 거리를 매개변수로 하여 경험적인 관계식을 나타낼 수 있음을 제시하였다. 여러 연구자들의 경험적인 연구결과를 종합하면, 지반의 진동속도는 지발당장약량과 발파원으로 부터의 거리를 주요변수로 하여 (1)식과 같은 형태로 표시할 수 있다. 한편 일본에서도 입지특성 환산식이라하여 (2)식과 같은 형태로 표시하지만 진동속도를 발파원으로 부터 지발당장약량의 함수로 표시한 것은 역시 마찬가지이다.

$$V = K(R/W^b)^{-n} \quad (1)$$

$$V = K R^n W^m \quad (2)$$

여기서 V:지반의 진동속도 (Particle Velocity, cm/s)

R : 발파원으로부터 거리 (m)

W : 지발당장약량 (kg)

K, n, m : 지질암반조건, 발파조건 등에 따른 상수

b : 1/2 또는 1/3

식(1)에서 거리와 지발당장약량의 비를 환산거리(Scaled Distance, SD), $b = 1/3$ 이면 삼승근 환산거리(Cube Root Scaled Distance)라 한다.

이는 각각 거리를 장약량의 자승 및 삼승의 비율로 환산한 형태이다. 식(2)는 환산거리가 대단히 작은 경우, 즉 근접발파에서 유용한 것으로 알려지고 있다. 일반적으로 짧은 거리에서는 삼승근이, 먼거리에서는 자승근이 더욱 잘맞는 것으로 알려져있다. (1)식의 발파진동식에서는 지반의 공학적 성질이나 발파조건 등에 따른 진동감쇠특성이 결국 상수 K_n 에 반영되어 표시되므로 안전발파설계를 위해서는 대상지역에서 시험발파를 통한 K_n 상수값을 결정하는 것이 대단히 중요하게 된다. 현재까지 국내에서 학회지를 중심으로 발표된 발파진동측정과 발파진동식에 대한 연

구를 정리하면 표1, 표2,와 같다.

각각의 장약량, 천공배열, 지발시간, 발파형태 등 발파조건이 일정하지 않아 일률적으로 비교할 수는 없지만 현재 국내에서의 발파진동식 결정의 현황을 파악하는 데는 매우 유용할 것이다. 전체적으로 암반의 종류나 암석의 물리적 성질이 발파진동의 전파특성과 진동수준에 미치는 영향이 정량적으로 규명되지는 않았고, 자발당장약량을 제외한 발파형태나 설계변수들의 영향에 대해서는 경향성만 파악하고 있을 뿐 정량적인 일정한 관계식으로 표현하고 있지 못하다. 따라서 이들에 대한 연구가 심도있게 진행되어야 할 것이다.

표 1. 발파진동측정결과

Site	Rock Type	Sc(kg/cm ³)	Blasting Type	Explosives	V = K(SD) ⁿ	
					K	n
Miari	Granite	880	TC	GD	90	1.67
		1200	BH	GD	99	1.72
				SE	76	1.72
Samsungyo	"	1450	BT	GD	138	1.60
				SE	107	1.63
Kumhodong	"	1230	BH	GD	93	1.70
Jangchungdong	"	780	TC	GD	85	1.70
			BH	SE	58	1.70
				AD	47	1.70
Hongundong	"	350	TC	SE	60	1.72
			BT	GD	94	1.64
Toegero4	"	390	TC	AD	48	1.54
Dongjadong	Gneiss	1400	BT	GD	87	1.50
			BH	GD	49	1.50
Paksugogae	"	850	TC	GD	56	1.50

Sc : Compressive Strength TC : Tunnel Center Cut BT : Botton Blasting
 BH : Bench Blasting GD : Gelatine Dynamite AD : Ammonium Dynamite
 SE : Slurry Explosives

표 2. 국내의 추정 발파진동속도 상수의 예

Resercher	Condition of Rock Mass	Pattern of Blasting	Type of Explosive	SD(Scaled Distance)	Equation of Blast-Induced Ground Vibration
Jung In Lee (1979)	Lime Stone	Bench Blasting	ANFO	Square Root Scaled Distance	$K_{50}=45.24, n=-1.803$
Hyung Sik Yang (1990)	Lime Stone	Bench Blasting	Gelatine Dynamite	Cube Root Scaled Distance	$K_{50}=103.2, n=-1.64$ $K_{95}=272.0, n=-1.64$ $K_{99}=406.3, n=-1.64$
Jung In Lee (1990)	Granite Gneiss	Bottom Blasting (Test Blasting)	Gelatine Dynamite	Cube Root Scaled Distance	$K_{50}=128.0, n=-1.754$ $K_{95}=260, n=-1.754$ $K_{100}=367, n=-1.754$
Han Wook Lim	Gneiss sand Stone Granite	Surface Blasting Turnnel Blasting Surface Blasting Surface Delay Center Cut (1 Free Face) Bench Blasting (2Free Face)	Gelatine Dynamite & Shurry	Cube Root Scaled Distance	$K_{50}=36, n=-1.337$ $K_{50}=13, n=-0.854$ $K_{50}=1027, n=-2.339$ $K_{50}=29, n=-1.230$ $K_{50}=44, n=-1.376$ $K_{50}=14, n=-1.014$

2.2 발파진동속도와 안전기준

미국, 캐나다, 유럽 등에서 수십년간 연구한 결과를 종합하면 인체가 감응하는 정도는 가속도 성분에서 따라 변하고 구조물이 받는 피해의 정도는 진동속도 성분에서 직접적인 관련이 있는 것으로 알려져 있다. 즉 구조물이 받는 피해의 정도는 발파 진동속도에 비례한다고 할 수 있다. 대표적인 각 나라의 진동속도기준을 표3, 4, 5에 나타내었다. 또한 1980년에 Siskind는 40Hz이하의 낮은 발파진동에서는 1.2cm/s의 진동수준에서도 건물에 피해를 줄 수 있다고 주장하였다.

표 3. 미국광무국(U.S.B.M) 및 듀폰사가 제안한 구조물의 피해안전 기준

최대진동속도(sec/s)	피해 정도
30.5	터널암반의 나석유발
19.3	회벽에 커다란 피해
13.7	회벽이 갈라지기 시작
7.6	밀폐지역발파의 규제치
5.0	미광무국이 추천한 안전한계

표 4. 독일의 진동허용기준(DIN 4150)

건축물의 종류	허용진동치(cm/s)		
	<10Hz	10~50Hz	50~100Hz
유적이거나 고적 등의 문화재	0.3	0.3~0.8	0.8~2.0
결합이있는 건물, 빌딩이나 균열이 있는 저택	0.5	0.5~1.5	1.5~2.0
공업지역	2.0	2.0~4.0	4.0~5.0

표 5. 우리나라의 진동허용기준(노동부고시 제 94-26호)

구분	1	2	3	4
건물종류	문화재	주택, 아파트 (미세균열이 나타나있는정도)	상가 (균열 없는 상태)	철근콘크리트 빌딩 및 공장
건물기초에서 의 허용진동치(cm/s)	0.2	0.5	1.0	1.0~4.0

그리고 서울대학교 이정인 교수는 10~35Hz 에서는 1~2cm/s, 35Hz이상에서는 5cm/s 허용기준으로 제시한 바 있으며 정상적인 구조물인 경우 2.5cm/s에서 피해가 없었다고 보고하였다.

3. 발파진동의 예측

3.1 측정대상지역의 발파환경 및 지질

본 지역은 대구광역시 남구 대명동 산 201-4번지 일대의 대덕문화전당 신축공사를위한 터파기발파현장으로써 발파현장상황과 지질은 그림1과 같다.

본 지역의 지질은 기반암으로 백악기(Cretaceous Period) 경상계 불국사 화강암류에 속하는 규장암이 분포하고 그 상부에 신라통 반야월층에 속하는 세일 및 이암이 규장암의 관입에 의해 호은펠스화 되었다.

본 지역의 규장암은 매우 견고하며 상부의 세일 및 이암도 표층부 일부를 제외하고는 견고하고 호은펠스로 변질되었다. 본지역은 층리 및 절리등의 지질구조가 주로 발달하는데 이들 구조선의 주축방향은 NW이며 부축방향은 대체로 EW방향으로 발달하고 있다.

발파환경을 그림1에서 보는 바와같이 측정위치로부터 약 20~50m 범위가 대부분으로 상부 세일층과 하부 규장암층에서 발파가 실시되었으며, 진동측정은 약 6m깊이의 지하콘크리트 수조상부에 설치하여 측정하였다.

본 탱크는 도형으로 탱크주변은 흙으로 매운 상태이다.

발파에 사용한 화약류는 셀라틴 다이너마이트(GD) $\phi 25\text{mm}$ 이며 공당장약량은 0.375~1kg의 소량발파이다.

발파진동측정기는 Thomas Instruments Inc(U.S.A)의 VMS-100S 기종과 Blasmate II Instantel(CANADA) DS-677 기종을 사용하였다.

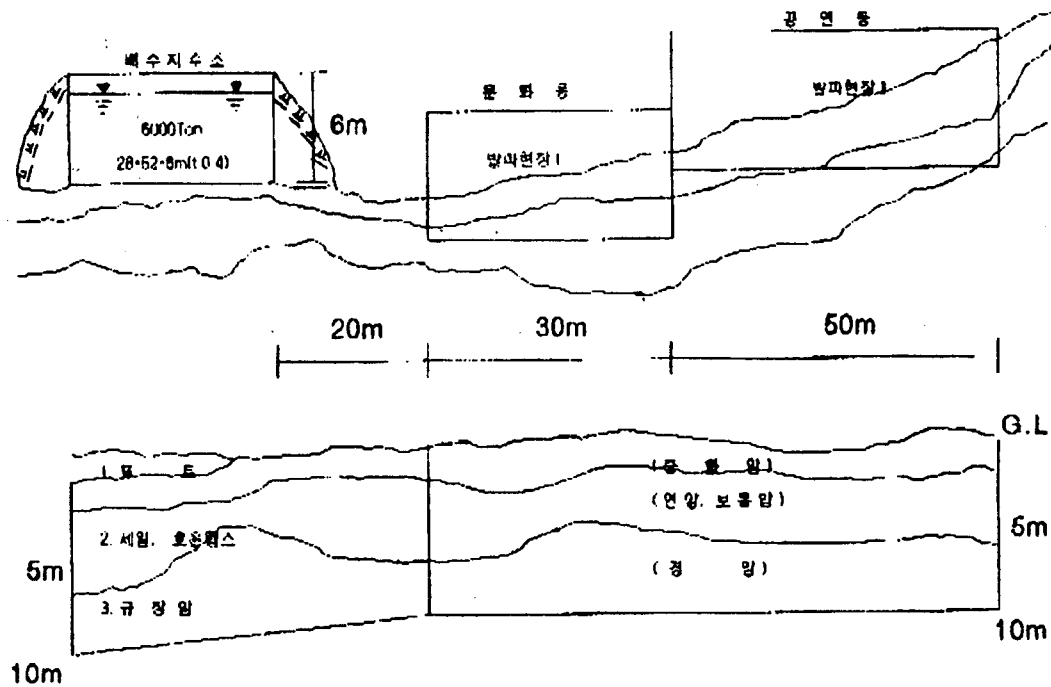


그림 1 발파현장의 횡단면도와 지질상태

3.2 입자속도 분포특성

발파에 의한 진동으로 구조물에 크게 영향을 미치는 것은 변위, 속도, 가속도 및 주파수 등이 있으며, 이중 가장 밀접한 것은 입자속도로 알려져 있다. 이론적으로 입자의 진동속도는 환산거리(Scaled Distance ; R/W^b , 여기서 $b=1/3\sim 1/2$)에 반비례하나, 지질조건, 화약의 종류, 파형, 장약배열, 기폭 및 계측 등에 의해 분산되며, 그 분포 특성은 지수정규분포로 알려져 있다. 그러므로 예측이 매우 어렵고 진동제어와 관련한 발파설계는 환산거리와 입자진동속도를 계측하여 입자상수를 결정하고 피해한계 진동속도와 주어진 거리로부터 최대허용장약량을 계산하는 것이 된다.

3.3 진동 상수(K) 및 감쇄지수(n)의 결정

1) 이론적 배경

일반적으로 입자진동식은 (1)식 혹은 다음과 같이 표현된다.

$$V = K(SD)^{-n} \dots \dots \dots (3)$$

식(3)에 로그를 취하면

$$\text{Log} V = \text{Log} K - n \text{Log}(SD) \dots \dots (4)$$

식 (4)는

$$Y = A_0 + A_1 X \dots \dots \dots (5)$$

로 선형식이 되며 계수 A_0, A_1 은 측정값으로부터 최소자승법에 의해 구하게 된다. 신뢰도 50%, 95% 및 99%의 한계치를 구하면

$$\left. \begin{aligned} K_0 &= \exp A_0 \\ K_1 &= \exp(A_0 + 1.645 \sigma) \\ K_2 &= \exp(A_0 + 2.326 \sigma) \end{aligned} \right\} \dots \dots (6)$$

여기서 σ Y의 표준편차

V 는 입자속도(mm/s)

SD는 환산거리($m/kg^{1/2}$ 혹은 $m/kg^{1/3}$)

K는 발파진동상수

n은 감쇄지수

2) 현장자료에 의한 예측식의 설계

일반적으로 측정값을 식(3)을 사용하여 최소자승법에 의해 계수 A_0 및 A_1 을 결정할 수 있다. 그런데 전체측정자료에 의한 일괄적인 분석은 그림 2와 같이 결정계수가 일반적으로 매우 낮은 값을 보일 수 있다. 상관관계(결정계수)는 W와 R값들이 각각 비슷한 경우로부터 얻어졌을 때 가장 정확하므로 본 연구에서는 먼저 R과 W가 같은 그룹(비슷한 경우)에 대하여 최대진동속도의 평균값을 계산하였으며 이때 표 6과 그림 3에서와 같이 이들간에 어느정도 상호 상관관계가 있음을 확인할 수 있었다. 또한 이들 값으로부터 최소자승법으로 K 및 n값을 자승근과 삼승근 환산거리에 대하여 전체에 대한 분석결과와 환산거리가 큰값 가운데 갖는 5개군의 값을 사용하여 표 7과 같이 분석하였다.

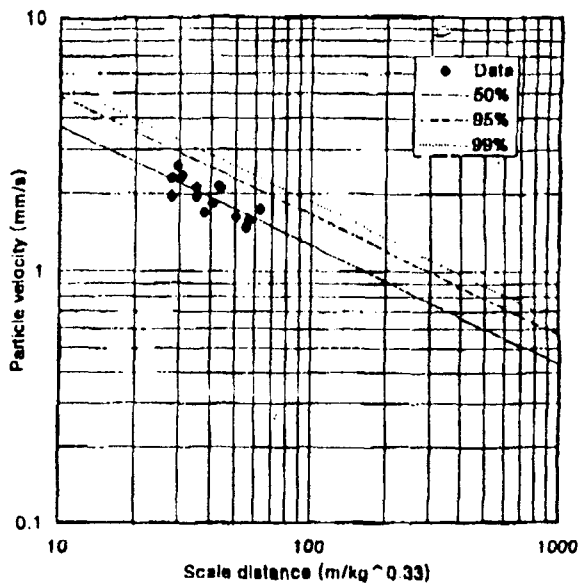


그림 2. 진동속도와 환산거리의 관계 (전체측정자료)

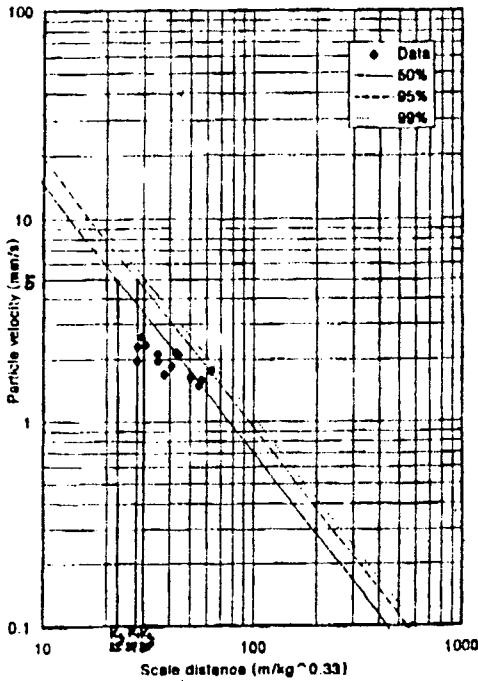


그림 3. 진동속도와 환산거리의 관계
(평균값 자료)

표 6. 동일한 환산거리에서 평균과 표준편차 계산표

SD	V	Vsd	No of samples
35.633	0.6695	0.2358	19
33.323	0.6745	0.4206	13
34.284	0.8582	0.2451	12
33.770	0.9496	0.1770	6
33.352	0.8377	0.2706	13
36.322	0.5220	0.1630	3
35.579	0.7554	0.2049	17
37.964	0.7455	0.3191	9
37.120	0.61187	0.3163	16
40.158	0.3943	0.1861	3
39.199	0.4859	0.2636	13
37.632	0.7659	0.2072	16
40.377	0.4538	0.2754	16
41.431	0.5582	0.1599	6

표 7. 자승근과 삼승근에 따른 K와 n값 분석 결과(전체값, 5개군값)

	SQUARE ROOT		CUBE ROOT	
	ALL	5 POINTS	ALL	5 POINTS
K	K=9.55	110.52	10.78	304.00
	k1=12.55	147.06	14.10	404.52
	k2=14.05	165.52	15.86	455.30
n	-0.4223	-1.0304	-0.4653	-1.3184

표 7에서 보는 바와 같이 전체값에 의한 분석은 2승근이나 3승근의 경우 모두 입지상수(발파진동상수) k값은 매우 적은 값을 나타내고 있고 감쇠지수 n은 -0.42 -0.46의 범위이다. 한편 환산거리가 큰쪽의 직선성을 나타내는 5개군에 의한 분석 K값은 지금까지 발표된 값들에 근접하는 110.5 및 304.0의 범위이며 감쇠지수 n은 -1.03 및 -1.31이다. 이들 K 및 n값은 대체로 일반적인 평면발파에서보다 적은 값을 나타내는데 특히 n이 적게 나타나는 것은 거리에 따른 감쇠가 적은 것을 의미하며, 이는 표토층(공사초기의 시험발파 때)에서 보다 하부 암반으로 진행하면서 암반에서의 진동전파에 의한 감쇠가 적음을 나타낸다고 할 수 있다. 이는 진동파동이 하부암반 매질을 통한 전파특성을 나타낸다고 볼 수 있다. 전체 회귀분석의 경우 환산거리가 적어짐에 따라 진동속도의 절대값과 또 진동속도 증가율이 5개군의 값에 의한 분석(전체 회귀분석보다 환산거리가 큰값 중에서 적성성이 확인되는 분석)에 비해 상대적으로 적기때문인데, 이는 콘크리트매질에 의한 에너지감쇠현상과 또한 발파지점과 진동측정지점간의 기하학적 관계에 의한 파의 전파특성에 기인된 것으로 볼 수 있다. 환산거리의 크기를 단순거리 개념으로 고려될 수 있는데 환산거리가 적을수록 더 많은 감쇠가 일어남을 알 수 있다. 배수지 수조 탱크 상부에서 측정하는 호이겐스 원리에 의해 콘크리트 밀면의 가장자리가 구면 발산의 하나의 점원이 되기 때문에 상대적으로 더 많은 감쇠현상을 일으키게 되고, 거

리가 가까울 수록 그 영향은 더커지는 때문에 진동속도는 상대적으로 적게 측정이 된다. 결론적으로 예측설계에 있어서 콘크리트 상부의 특정구조물에 대한 안전성의 문제가 아닌 경우, 중간지반 매질의 특성을 더 잘 반영하는 환산거리가 큰 값 가운데 직선성을 갖는 5개값에 의한 분석이 더욱 유효할 것이며, 이는 구조물의 하부, 노면에서 측정하는 효과와 근사할 것으로 판단된다. 만일 전체자료에 의한 분석결과를 기준으로 설계한다면 콘크리트 구조물의 수직구조에 의한 분석결과를 기준으로 설계한다면 콘크리트 구조물의 수직구조에 의한 감소현상으로 인해 설계기준과 상이한 결과가 예상된다. 따라서 원칙적으로 진동예측설계는 당현장의 경우 구조물의 하부 바닥면에서의 측정된 값에 의해 설계되거나 아니면 현장여건상 구조물 상부와 같은 특정 지점에서 측정된 자료에 의한 설계에서는 가급적 환산거리가 큰 값 사이의 직선성에 의한 분석이 보다 합리적이라고 생각된다. 따라서 본 지역에서의 예측식의 경우, 최대 허용 환산거리는 50%, 95% 및 99%의 유의수준에서 3승근의 경우 각각 22.5, 27.0, 30.6이다.

4. 발파진동의 주파수 특성과 구조물의 진동특성

4.1 발파진동의 주파수 특성

일반적으로 발파진동의 주파수 특성은 장약량이 크거나 거리가 멀어짐에 따라 주요주파수(Predominant frequency)는 저주파 성분이 되며 반대로 장약량이 적거나 거리가 짧은 경우는 고주파성분이 주요주파수가 된다. 본 연구에서는 각 진동속도의 각 성분에 대하여 환산거리, 거리 및 장약량에 따른 주요주파수 성분의 분포를 그림 4,5,6과 같이 분석하였다. 이들 그림은 각각 직선방향(R), 수평방향(T) 및 수직방향(V)의 최대진동속도에 대한 주 주파수분포현황을 도면화한 것으로 본 지역에서는 상기한 것과 일반적인 분포특성과 상이하며 거리, 환산거리 및 장약량의 크기와 뚜렷한 상관성을 확인하기 어려웠다.

4.2 콘크리트구조물의 진동특성

건물에 피해를 일으키는 진동의 한계에 대해서는 아직 충분히 알려져 있지 않다. 그러나 콘크리트 등 취성재료의 경우 파괴는 10^{-3} 정도의 변형으로 생긴다고 한다. 구조물의 탄성파속도는 재료에 의해 큰폭으로 달라지나 콘크리트 내지 벽과 같은 경우 $10^2 \sim 10^3$ mm/s 가 건물피해라고 생각된다. 또한 지반상과 건물 1,2층의 진동을 비교해보면 상하동은 대체로 불변내지 감쇠경향을 보인다고 한다. 그러므로 당보고서의 6m 높이의 상수용 수조 콘크리트 구조물의 경우 진동특성은 감쇠경향을 보인 것으로 판단된다.

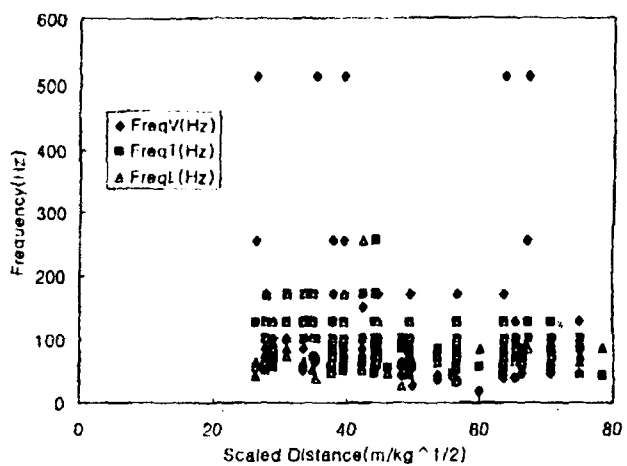


그림 4. 환산거리와 주파수

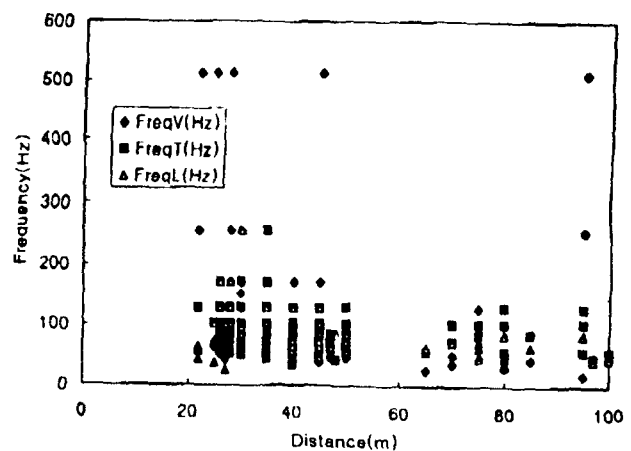


그림 5. 거리와 주파수

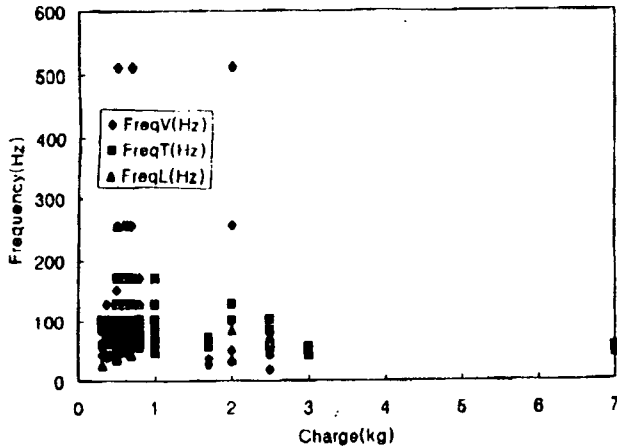


그림 6. 장약량과 주파수

5. 결론

도심지 발파는 민원문제와 발파효율 문제를 동시에 고려해야 하기 때문에 매우 치밀한 설계가 요구된다. 본 연구는 대구 도심지에서 시행한 안전제어발파에 대한 진동특성을 지상고 6m 높이의 상수원 물탱크인 배수지수조 콘크리트 상에서 측정한 자료에 대한 분석에 의해 보다 효율적인 예측식을 산출하여 합리적인 발파설계를 하고자 하였다. 본 지역은 지질적으로 표토층에 세일 및 이암이 호른펠스화한 치밀한 암석과 그 하부에 또한 비교적 강도가 강한 규장암으로 구성되어 있어 효과적인 발파를 위해서는 적정량의 폭약을 사용해야 하기 때문에 최대 허용장약량 계산은 매우 중요하다고 생각된다. 따라서 안전과 발파효율을 동시에 고려한 적절한 설계가 요구되며 이에 대한 본 연구결과는 다음과 같다.

1. 발파진동 예측식은 발파지점과 진동에 의한 피해 대상지점간의 중간 매질의 특성을 반영하는 입지상수를 고려한 설계가 필수적 이라고 생각된다.
2. 진동 측정지점이 본 연구에서와 같이 특수한 구조상에 있을 경우 이들 구조물에 의한 감쇠가 일어나므로 이들 분석자료에 의

한 설계는 오판에 의한 설계가 될 수 있다.

3. 지표면에서 시험발파 자료가 없는 경우 특히 구조물상에서의 측정에 의한 설계는 가능한 환산거리가 큰 진동속도 평균값들을 사용하여 얻은 진동예측식에 의해 설계하는 것이 보다 효과적으로 생각된다.
4. 발파진동측정자료 224개 데이터 中 R과 W가 동시에 같은 14개 그룹 162개 데이터의 그룹별 평균값을 사용한 결정계수의 값이 낮아 상관관계가 적은 것으로 나타났기 때문에 이 그룹 중 거리가 먼 5개 그룹을 사용하여 회귀분석을 하였을 때 3승근의 경우가 보다 더 적용성이 있는 것으로 판단되었으며 삼승근 환산거리($SD^{0.33}$)는 22.5, 27.0, 30.6이었으며 이때 입지상수 $K_0=304.00$, $K_1=404.52$, $K_2=455.30$, $n=-1.31$ 였다.
5. 본지역의 발파진동의 주파수 특성은 환산거리, 거리, 장약량 크기에서 뚜렷한 상관성을 확인하기 어려웠다.
6. 본 연구는 지역의 특이한 주변환경에 대한 결과로 앞으로 이와 유사한 조건에 대해 더 많은 사례분석을 하여 더욱 보편타당한 결론의 유추가 필요하다고 본다.

참고문헌

1. Calvin J. Konya & Edward J. Walter(1990), "surface Blast Design, by Prentice-Hall, Inc." pp 240~281
2. Juka Nappuri Editor(1988), "Surface drilling and Blasting, TAMROCK", pp 238~248
3. Per-Anders persson, Roger Holmberg, Jaimin Lee(1992). "Rock Blasting and Explosives Engineering", pp337~373