

# 우리나라 자료를 이용한 발파 진동 예측식과 진동증폭계수

## Prediction of Vibration Variables and Determination of Amplification Factor from Domestic Blasting Data

양 형식, 장 선종

Hyung-Sik Yang and Sun-Jong Jang

전남대학교 건설지구환경공학부

### 초 록

본 연구에서는 국내의 발파 자료를 이용하여 지반진동을 무차원적으로 예측하는 경험식을 도출하였다. 또 지반진동에 의한 구조물진동의 증폭계수를 산정하여 구조물 예상 응답 스펙트럼을 작도할 수 있도록 하였다.

핵심어 : 발파진동, 주진동수, 응답스펙트럼,

### 1. 서론

발파 시공 전에 발파로 말미암는 지반진동의 크기와 주진동수를 예측할 수 있다면 발파설계에 이용할 수 있을 것이다. 또 발파 예정지역에 있는 구조물의 응답특성을 예측할 수 있다면 안전한 발파설계에 좋은 지침이 될 것이다. Dowding(1985)은 이러한 목적으로 미국 일리노이 주에서 실시된 여러 발파 자료들을 근간으로 지반진동 예측과 구조물 응답특성을 예비 작도하는 방법을 제시하였다. 그런데, 이 자료들은 미국의 시공 자료로 만들었기 때문에 우리나라의 발파와는 그 규모나 지반의 성격이 크게 상이하여, 직접 적용하기가 곤란하다.

본 연구에서는 그동안 계측된 여러 자료

본 연구에서는 그동안 계측된 여러 자료들을 이용하여 발파종류별로 지반진동을 무차원적으로 예측하는 경험식을 도출하였으며 지반진동에 대한 구조물 진동의 속도, 변위 및 가속도 증폭계수를 구하였다. 이들을 이용하여 지반진동에 따른 구조물의 예상 응답스펙트럼을 작도할 수 있도록 하였다.

### 2. Dowding의 지반진동 예측식

Dowding은 미국 내 채석장, 터널 수갱발파에서 단당 장약량이 1.1~8,900 kg인 12개 지역의  $u$ (변위),  $\dot{u}$ (속도) 및  $\ddot{u}$ (가속도)의 측정치와 발파 현상을 나타내는 여섯 개의 무차원 변수( $r/R$ ,  $\dot{u}c$ ,  $\ddot{u}/c^2$ ,  $ft$ ,  $tc/R$ )

$$\begin{aligned} u &= 0.072 \text{ mm} \left( \frac{30.5 \text{ m}}{R} \right)^{1.1} \left( \frac{3050 \text{ m/s}}{c} \right)^{1.4} \left( \frac{W}{4.54 \text{ kg}} \right)^{0.7} \left( \frac{2.4}{\rho} \right)^{0.7} \\ \dot{u} &= 18.3 \text{ mm/s} \left( \frac{30.5 \text{ m}}{R} \right)^{1.46} \left( \frac{W}{4.54 \text{ kg}} \right)^{0.48} \left( \frac{2.4}{\rho} \right)^{0.48} \\ \ddot{u} &= 0.81 \text{ g} \left( \frac{30.5 \text{ m}}{R} \right)^{1.54} \left( \frac{c}{3050 \text{ m/s}} \right)^{1.45} \left( \frac{W}{4.54 \text{ kg}} \right)^{0.28} \left( \frac{2.4}{\rho} \right)^{0.28} \end{aligned} \quad (1)$$

및  $W/\rho c^2 R^3$ )을 이용하여 지반진동 추정식 (1) 을 제안하였다.

여기서 R은 폭원과 측점의 거리(m), c는 지반의 탄성과 전파속도(m/s), W는 지발당 장약량(kg),  $\rho$ 는 단위중량( $ton/m^3$ )이다.

이 식에 의하면 Dowding이 수집한 발파 자료의 평균적인 발파 규모는 지발당 4.54 kg이며 이때 폭원과 구조물의 평균거리는 30.5 m이다. 또 지반의 평균물성은 탄성과 속도가 3,050 m/s이며 단위중량은 2.4  $ton/m^3$ 로 된다. 이러한 수치는 대단히 광범위한 자료를 근거로 만들어졌다고 하지만, 우리 현실과는 맞지 않는 점이 있다.

### 3. 우리나라의 지반진동 예측식

#### 3.1 이용자료

국내의 계측자료를 이용하여 예측식을 도출하기 위해 노천 건설발파 현장 12개소, 터널발파 4개소 및 석산 발파 3개소의 자료 579 세트를 선택하였다(표 1). 이 자료들은 지반진동의 계측자료로서 지반진동의 파형이 양호하며 지반상태나 발파의 자료가 명시되어 있고 계측이 충실히 이루어진 자료들이다. 그러나 석산 자료가 상대적으로 부족하여 Dowding의 자료 30점을 같이 처리하였다.

변위, 속도, 가속도 예측식을 산출하기 위하여 실제 계측이 이루어지지 않은 몇몇 번

수들은 가정에 의하였다. 즉 노천 건설발파의 경우 탄성과속도는 4000 m/s, 단위중량은 2.55  $ton/m^3$ 를 사용하였다. 이들은 국제지질학회의 연암과 경암의 경계치이다. 터널의 경우, 탄성과속도와 단위중량은 광주 제2순환 도로 4개 터널의 평균치인 4440 m/s와 2.65  $ton/m^3$ 를 사용하였다.

표 1. 해석에 사용된 자료

	현 장 명	자 료 수
노천 건설발파	영광-해보	27
	장흥	19
	진월-광영	18
	서수-군산1	33
	서수-군산2	32
	서수-군산3	12
	기호물류	30
	진도공설	33
	고창-담양	18
	거금도	13
	덕례-대림	18
	삼원기업	34
	소계	287
터널발파	부연터널	77
	고덕터널	31
	두정터널	36
	마석터널	64
	소계	208
석산	Dowding 자료	30
	남원석산	5
	A-석회석 1차	39
	A-석회석 2차	40
	소계	114
	합계	609

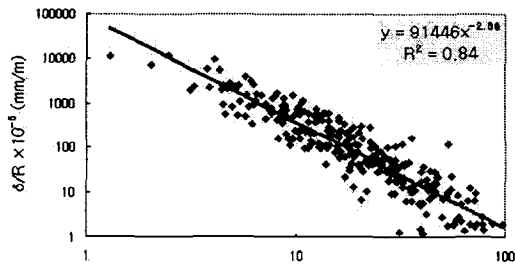
표 2. 발파규모, 거리, 지반의 성질 및 계측 결과의 평균

구분	W	R	c	$\rho$	u	$\dot{u}$	$\ddot{u}$	w
	kg	m	m/s	$g/cm^3$	mm	mm/s	g	Hz
노천 건설발파	4.08	118	4036	2.57	0.0145	4.89	0.26	50
터널발파	16.67	225	4419	2.64	0.0077	3.38	0.23	83
채광-노천	53.00	300	4346	2.67	0.0879	16.93	0.69	21
Dowding	4.54	30.5	3050	2.40	0.072	18.3	0.81	-

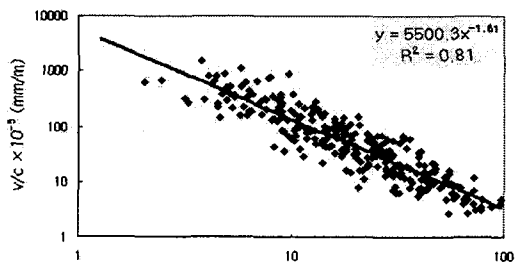
또 석산의 경우 탄성파속도와 단위중량을 신선암으로부터 직접 구한 측정치를 사용하였다. 이러한 자료로부터 구한 장약량, 거리, 탄성파, 밀도, 변위, 속도, 가속도 및 주진동수의 평균은 표 2와 같다.

### 3.2 도출 과정

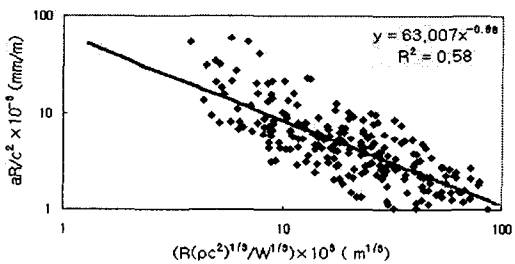
먼저 각 발파 종류별로 무차원 환산거리와 진동 변위, 속도, 가속도 무차원 항과의 관계식을 도출하였다.



(a)



(b)

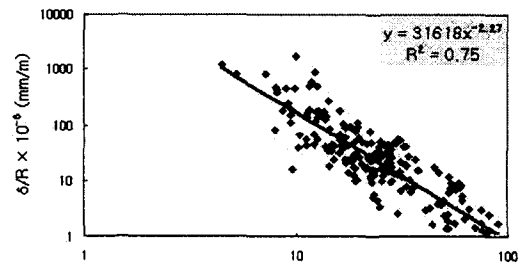


(c)

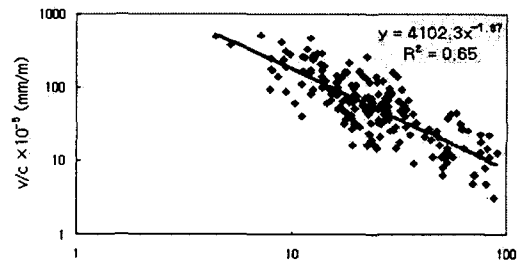
그림 1. 무차원 환산거리와 진동변수의 관계(노천 건설발파)

그림 1~3은 노천 건설발파, 터널발파 및 석산발파 자료로부터 구한 무차원 환산거리와 변위, 속도 및 가속도에 대한 무차원 변수의 관계도이다.

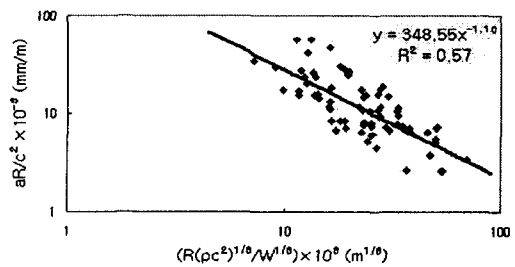
무차원 변수들 간의 비례관계식으로부터 변위와 속도 및 가속도를 변수 분리하여 정리하면 식 (2)와 같다.



(a)

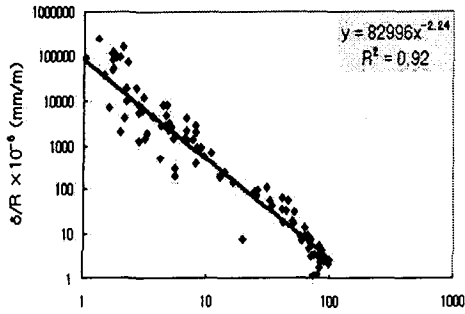


(b)

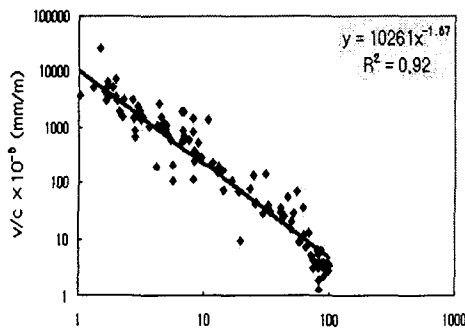


(c)

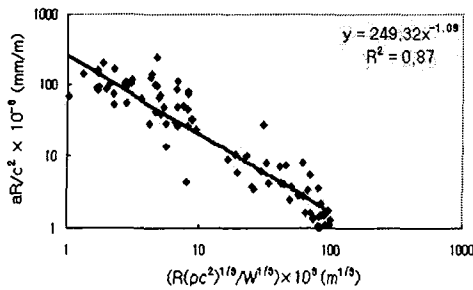
그림 2. 무차원 환산거리와 진동변수의 관계 (터널발파)



(a)



(b)



(c)

그림 3. 무차원 환산거리와 진동변수의 관계(석산발파)

$$\delta = K_{\delta} R^{1-n_{\delta}} \rho^{-\frac{1}{3}n_{\delta}} c^{-\frac{2}{3}n_{\delta}} W^{\frac{1}{3}n_{\delta}}$$

$$v = K_v R^{-n_v} \rho^{-\frac{1}{3}n_v} c^{1-\frac{2}{3}n_v} W^{\frac{1}{3}n_v}$$

$$a = K_a R^{-n_a-1} \rho^{-\frac{1}{3}n_a} c^{2-\frac{2}{3}n_a} W^{\frac{1}{3}n_a} \quad (2)$$

여기서  $\delta$  는 변위(mm),  $v$ 는 속도(m/s),  $a$ 는 가속도(m/s<sup>2</sup>)이다. 그림 1~3의 직선식을 이용하여 (2)식으로 구한 각 변수의 승수는 표 3과 같다.

표 3. 각 변수에 대한 승수

구분		R	$\rho$	c	W
노천 건설발파	변위	-1.38	-0.79	-1.59	0.79
	속도	-1.61	-0.54	-	0.54
	가속도	-1.88	-0.29	1.41	0.29
터널발파	변위	-1.27	-0.76	-1.51	0.76
	속도	-1.37	-0.46	-	0.46
	가속도	-2.10	-0.37	1.27	0.37
채광-노천	변위	-1.24	-0.75	-1.49	0.75
	속도	-1.67	-0.56	-	0.56
	가속도	-2.09	-0.36	1.27	0.36
Dowding	변위	-1.10	-0.70	-1.40	0.70
	속도	-1.46	-0.48	-	0.48
	가속도	-1.84	-0.28	1.45	0.28

### 3.3 진동예측식

이상의 과정을 통하여 구한 우리나라 지반의 발파 종류별 진동 예측식은 다음과 같다.

노천 건설발파

$$\begin{aligned}
 u &= 0.0145 \text{ mm} \left( \frac{118m}{R} \right)^{1.38} \left( \frac{4036m/s}{c} \right)^{1.59} \left( \frac{W}{4.08kg} \right)^{0.79} \left( \frac{2.57}{\rho} \right)^{0.79} \\
 \dot{u} &= 4.89 \text{ mm/s} \left( \frac{118m}{R} \right)^{1.61} \left( \frac{W}{4.08kg} \right)^{0.54} \left( \frac{2.57}{\rho} \right)^{0.54} \\
 \ddot{u} &= 0.26g \left( \frac{118m}{R} \right)^{1.88} \left( \frac{c}{4036m/s} \right)^{1.41} \left( \frac{W}{4.08kg} \right)^{0.29} \left( \frac{2.57}{\rho} \right)^{0.29}
 \end{aligned} \tag{3}$$

터널발파

$$\begin{aligned}
 u &= 0.0077 \text{ mm} \left( \frac{225m}{R} \right)^{1.27} \left( \frac{4419m/s}{c} \right)^{1.51} \left( \frac{W}{16.67kg} \right)^{0.76} \left( \frac{2.64}{\rho} \right)^{0.76} \\
 \dot{u} &= 3.38 \text{ mm/s} \left( \frac{225m}{R} \right)^{1.37} \left( \frac{W}{16.67kg} \right)^{0.46} \left( \frac{2.64}{\rho} \right)^{0.46} \\
 \ddot{u} &= 0.23g \left( \frac{225m}{R} \right)^{2.10} \left( \frac{c}{4419m/s} \right)^{1.27} \left( \frac{W}{16.67kg} \right)^{0.37} \left( \frac{2.64}{\rho} \right)^{0.37}
 \end{aligned} \tag{4}$$

석산발파

$$\begin{aligned}
 u &= 0.0879 \text{ mm} \left( \frac{300m}{R} \right)^{1.24} \left( \frac{4346m/s}{c} \right)^{1.49} \left( \frac{W}{53kg} \right)^{0.75} \left( \frac{2.67}{\rho} \right)^{0.75} \\
 \dot{u} &= 16.93 \text{ mm/s} \left( \frac{300m}{R} \right)^{1.67} \left( \frac{W}{53kg} \right)^{0.56} \left( \frac{2.67}{\rho} \right)^{0.56} \\
 \ddot{u} &= 0.69g \left( \frac{300m}{R} \right)^{2.09} \left( \frac{c}{4346m/s} \right)^{1.27} \left( \frac{W}{53kg} \right)^{0.36} \left( \frac{2.67}{\rho} \right)^{0.36}
 \end{aligned} \tag{5}$$

## 4. 증폭계수와 응답스펙트럼

### 4.1 Duhamel 적분식

지반진동에 대하여 Duhamel의 적분식 (6)을 이용하여 지반진동 이력  $\dot{u}(t)$ 를 적분하면 구조물의 응답특성 스펙트럼을 구할 수 있다.

$$\begin{aligned}
 \delta(t) = & - \int_0^t \dot{u}(\tau) e^{-\beta p_d(t-\tau)} [\cos\{p_d(t-\tau)\} \\
 & - \frac{\beta}{\sqrt{1-\beta^2}} \sin\{p_d(t-\tau)\}] d\tau \tag{6}
 \end{aligned}$$

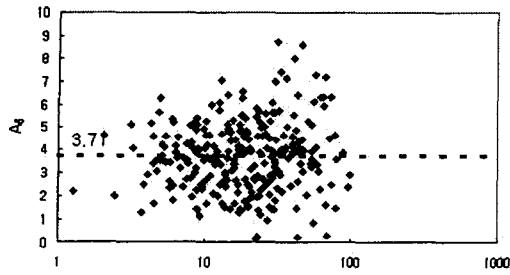
식에서  $p_d$ 는 감쇠진동수,  $\beta$ 는 감쇠율,  $t$ 는 시간,  $\tau$ 는 미소적분시간이다. 식을 이용하여 임의 주파수 대역에서 계산된  $\delta_{\max}$ 을 원고유

진동수  $p(=2\pi f)$ 와 곱하여 의속도(pseudo-velocity),  $PV = P \cdot \delta_{\max}$ 를 구하고 각각의 주파수대에 해당하는 의속도를 그리면 응답스펙트럼이 작성된다.

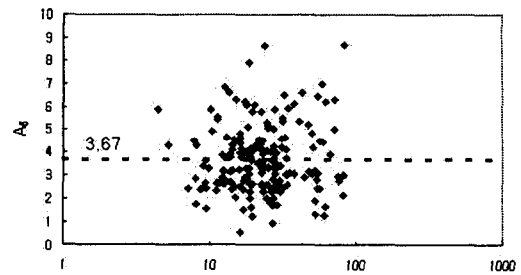
응답스펙트럼은 진동이 구조물에 미치는 최대의 변수 값을 나타내며 가로축은 진동수(Hz)를 의미한다.

### 4.2 증폭계수

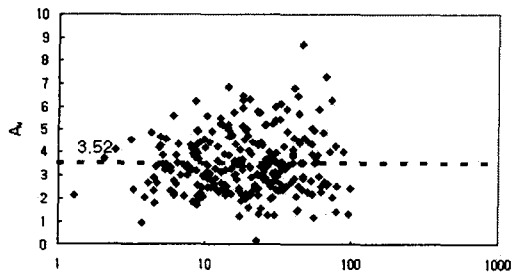
Duhamel의 적분에 의한 진동응답스펙트럼은 지반진동의 이력이 있어야 구할 수 있으며, 이렇게 구해진 응답스펙트럼은 무수히 많이 형성될 수 있는 응답스펙트럼의 하나일 뿐이다. 따라서 간편하게 응답스펙트럼을 구할 필요가 제기된다.



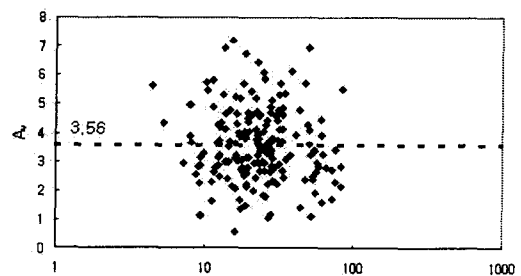
(a) 변위



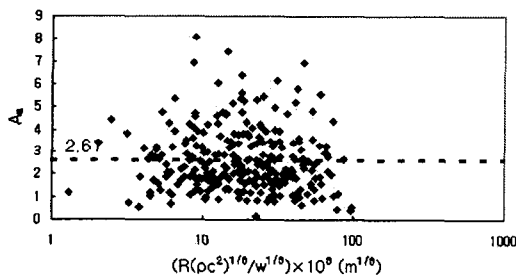
(a) 변위



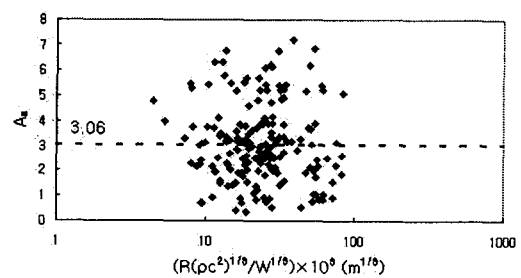
(b) 속도



(b) 속도



(c) 가속도



(c) 가속도

그림 4. 노천 건설발파의 증폭계수

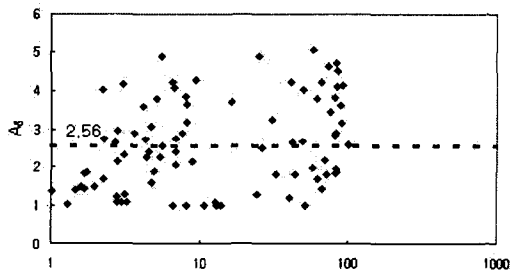
그림 5. 터널발파의 증폭계수

이는 입력 지반진동에 의해 평균적으로 형성되는 변위, 속도 및 가속도 경계를 구하고 그 증폭계수를 계산함으로써 구할 수 있다.

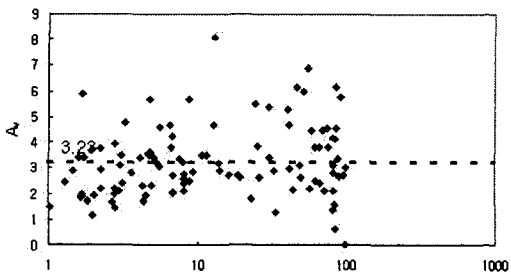
그림 4~6은 노천 건설발파, 터널 발파와 석산 발파 진동속도 기록으로부터 감쇠율  $\beta = 3\%$ 로 하여 구한 변위, 속도 및 가속도 경계 증폭계수를 환산거리별로 구성한 것이다.

그림 6에서 보는 바와 같이 증폭계수와 환산거리의 비례관계는 특별한 경향을 보이지 않는다. 또 비교적 분산정도가 크다.

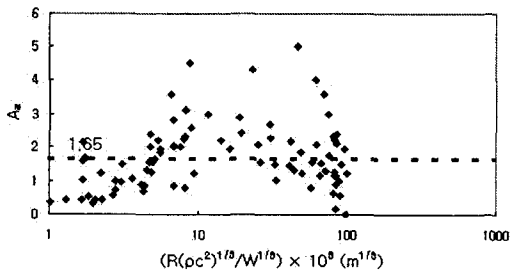
이상의 결과를 정리하면 표 4와 같다. 표에서 Dowding의 결과와 크게 다르지 않으며 이로써 응답스펙트럼의 작도에는 충분히 사용할 수 있을 것으로 생각된다.



(a) 변위



(b) 속도



(c) 가속도

그림 6. 석산발파의 증폭계수

표 4. 변위, 속도, 가속도의 평균 증폭계수

구 분	증폭계수		
	변위	속도	가속도
노천 건설발파	3.71	3.52	2.61
터널발파	3.67	3.56	3.06
석산발파	2.56	3.23	1.65
Dowding	1.2 (Wash.: 2.5)	3.2~5.2	2.5

\*Wash.는 워싱턴 D.C. 자료만으로 구한 값

### 4.3 응답스펙트럼 작성례

그림 7은 표 5의 터널발파 자료로부터 응답스펙트럼을 구한 일례이다.

변위와 속도 및 가속도는 제안식 (3)을 이용하여 식(7)과 같이 예측할 수 있다.

표 5. 터널발파 자료 일례

구 분	W	R	c	ρ
터널발파	15.75	122	4440	2.65

표 6은 실측치와 제안식에 의한 값을 비교한 표로 예상치가 보수적인 결과를 나타내고 있다.

표 6. 실측치와 예상치의 비교

구 분	δ	v	a
실측치	0.0081	3.43	0.15
예상치	0.0159	7.60	0.81

$$u = 0.0077 \text{ mm} \left( \frac{225}{122} \right)^{1.27} \left( \frac{4419}{4440} \right)^{1.51} \left( \frac{15.75}{16.67} \right)^{0.76} \left( \frac{2.64}{2.65} \right)^{0.76} \\ = 0.0159 \text{ mm}$$

$$\dot{u} = 3.38 \text{ mm/s} \left( \frac{225}{122} \right)^{1.37} \left( \frac{15.75}{16.67} \right)^{0.46} \left( \frac{2.64}{2.65} \right)^{0.46} \\ = 7.6 \text{ mm/s} \tag{7}$$

$$\ddot{u} = 0.23 \text{ g} \left( \frac{225}{122} \right)^{2.10} \left( \frac{4440}{4419} \right)^{1.27} \left( \frac{15.75}{16.67} \right)^{0.37} \left( \frac{2.64}{2.65} \right)^{0.37} \\ = 0.81 \text{ g}$$

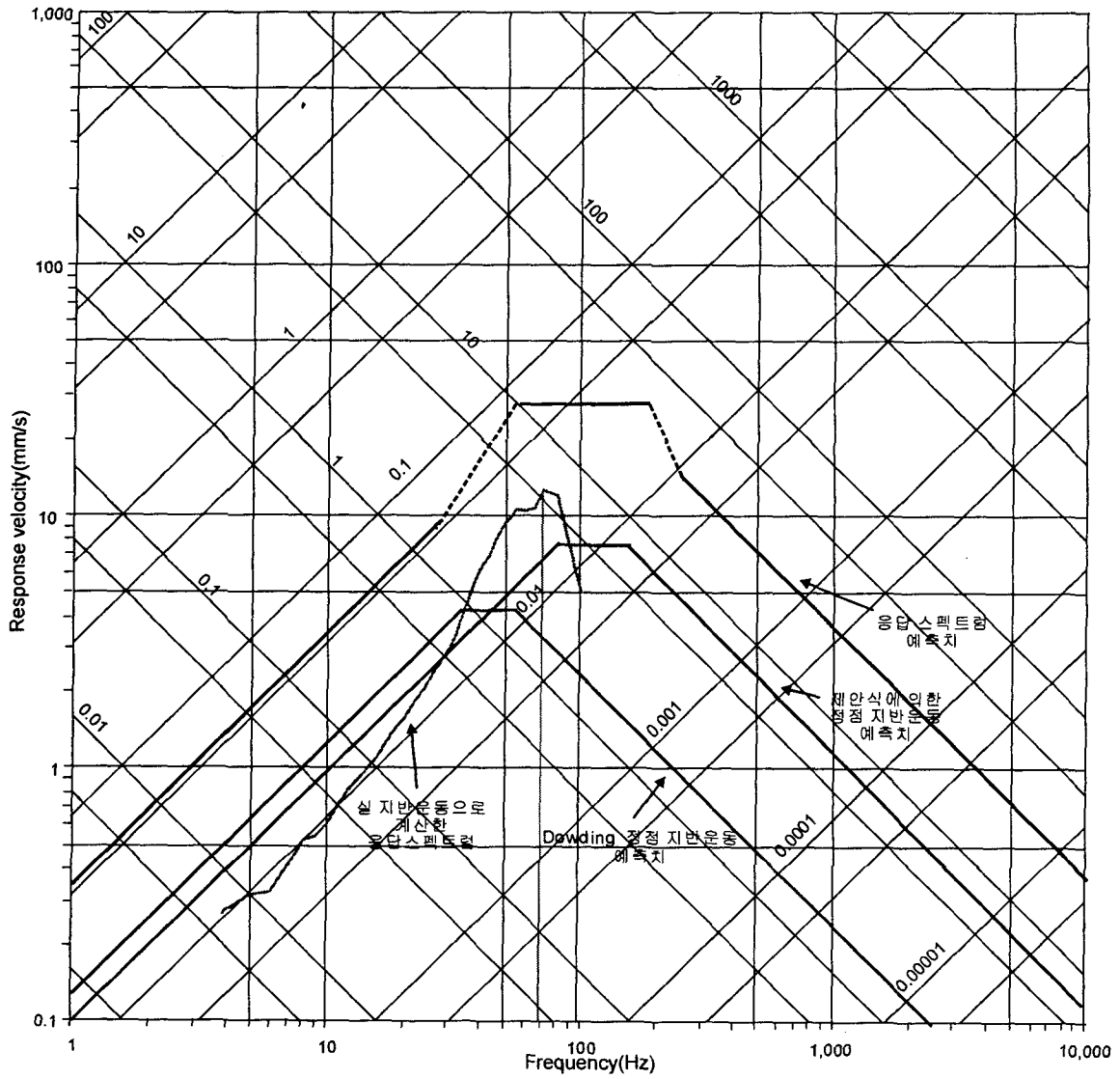


그림 7. 터널발파의 응답스펙트럼 예측 일례

이 예상치를 이용하여 정점지반운동 예측치를 작도하며 이 값에 의한 그래프에 적당한 증폭계수를 곱하면 응답스펙트럼 예측선이 작도된다.(Newmark와 Hall, 1969) 그림 7은 이와 같은 과정에 의해 작도된 터널발파의 응답스펙트럼 예측 일례이다.

### 5. 고찰과 결론

본 연구에서는 Dowding의 진동 예측식을 유도한 자료가 우리나라와는 발파 규모나 지반의 상태가 다르다는 점을 감안하여, 국내에서 계측된 노천 건설발파, 터널발파 및 석산 발파 자료 등 600 여 세트의 자료를 이용하여 국내 상황에 맞는 진동예상식을 유도하였다.



구해진 예상식은 각 발파 종류별로 100~300개가량의 자료로부터 얻어진 것이지만 이들 자료가 국내의 다양한 발파 환경을 대표한다고 볼 수는 없다. 따라서 앞으로 여러 가지 다른 발파환경의 자료들이 보충되면 이 예상식은 더욱 적용성이 높은 자료로 될 수 있을 것이다.

한편 이들 진동이력을 Duhamel의 적분식으로 처리하여 진동 변수들에 대한 증폭계수를 구하였다.

증폭계수들은 환산거리와는 특별한 비례 관계를 보이지 않았으며 분산이 많이 일어났다. 이러한 결과는 다양한 경로를 통하여 전달되고 합성된 파형의 주파수 특성 때문으로 생각된다. 그러므로 진동 증폭계수는 환산거리에 무관하게 일반적인 발파상황에서 진동으로 인한 구조물의 공진으로 인한 증폭의 상한과 하한을 규정해 줄 수 있는 것으로 생각된다.

간단한 사례에 적용한 결과, 예상식은 실제 계측치 보다 안정측인 것으로 나타났으며 이 진동기록과 증폭계수를 이용하여 지반진동의 응답스펙트럼과 구조물의 예상 응답스펙트럼을 작성할 수 있었다. 이와 함께 적절한 피해임계수준을 고려하면 구조물 피해여부도 예측할 수 있을 것이다.(양 외, 1999)

현재 우리나라에서 주로 적용되고 있는 진동예상식은 Devine의 환산거리식이나, 입지상수와 감쇠지수의 범위가 너무 크고 또 발파의 규모에 따라서 달라지므로(양, 1992), 사실상 설계용으로 사용하기 부적당하다는 점을 감안하면, 이 연구를 통하여 제시된 예상식은 그 적용 폭이 더 넓다고 할 수 있다. 또 평균 증폭계수를 이용한 구조물 응답스펙트럼의 작성이 손쉽게 이루어 질 수 있으므로 구조물 주변에서의 발파 작업에 간략

한 지침이 될 수 있을 것으로 기대된다.

### 감사의 말

이 논문은 2001년도 전남대학교 학술연구비의 지원을 받은 "발파진동으로 인한 콘크리트 구조물의 균열 전파 특성 연구" 결과의 일부이며 당국에 감사의 뜻을 전한다.

### 참 고 문 헌

1. 양형식, 김남수, 전양수, 정지문, 김재철, 문승백, 조상호, 진연호, 1999, 발파진동으로 인한 조적조 가옥 피해의 임계수준 평가, 터널과 지하공간(한국암반공학회지), vol.9. no.1, pp.72-77.
2. 양형식, 1992, 지표발파의 진동특성에 관한 기초연구, 터널과 지하공간(한국암반공학회지), vol.2, no.2, pp.199-211.
3. Dowding, C.H., 1985, Blasting Vibration Monitoring and Control, Prentice Hall, Englewood Cliffs, pp.78~88.
4. Newmark, N.M, and W.J. Hall, 1969, Seismic design criteria for nuclear reactor facilities, Procd. 4th World Conf. on Earthquake Eng., Int. Association of Earthquake Eng. Vol. 2, Santiago, Chile, pp.37~50.