

## 발파에 의한 근거리 지중진동의 예측방법에 관한 연구

이 효<sup>1)\*</sup>, 강추원<sup>2)</sup>, 고진석<sup>3)</sup>

### A Study on Prediction of Ground Vibration by Near Field Blasting

Hyo Lee, Chu-won Kang and Jin-seok Ko

**Abstract** For blasting vibration analysis, there are mostly two methods, firstly, far field vibration analysis to estimate limit of building damage, secondly, near field subterranean vibration analysis to estimate rock damage and subterranean structure facilities.

The former has been mainly used in our country and abroad, the latter is mostly analysed by using Homberg's model. In this model, basic input data are acquired in far field surface vibration. But in the consideration of the results of being conducted in this area over the past few decade, it is required that Homberg's model is modified. For the purpose of this, measurements of near field vibration were first conducted in our country.

But it was only proposed the measurement method and the method of analysis or prediction was not suggested. Accordingly, in this paper, measurements of near field subterranean vibration were conducted and the method of analysis or prediction of near field subterranean vibration would be suggested.

**Key words** Far field vibration, Near field subterranean vibration, Rock damage, Homberg's model, Prediction of near field vibration

**초 록** 발파진동의 해석영역은 크게 두 가지 영역으로 구분될 수 있다. 첫째는, 대상 지장물에 대한 영향을 평가할 목적으로 시행되는 원거리 진동분석과, 둘째는, 암반의 손상 및 근거리 지중 구조물에 대한 영향을 평가할 목적으로 시행되는 근거리 지중진동 분석이 있다. 전자의 분석방법은 현재 국내외에서 보편적으로 활용되는 방법이며, 후자의 경우는 대체적으로 Holmberg모형을 사용하여 분석이 이루어져 왔고, 이 모델에 의해 제안된 방법은 기본적인 자료를 원거리 지표 진동 측정 데이터를 활용하는 방법을 근간으로 하여 분석이 이루어진다. 그러나, 최근 십수년동안 수행된 근거리 지중진동 실계측 결과에 따르면 Holmberg모형의 보완에 대한 필요성이 대두되었으며, 국내에서도 처음 시도되어 그 방향성을 제시하고자 하였으나 계측하는 방법에만 한정되었을 뿐 적절한 해석 모델 및 예측방법을 제시하지는 못했다. 따라서, 본 연구에서는 근거리 지중진동의 실계측을 통해 그 결과를 근간으로 하여 적절한 해석모델 및 예측방법을 제시하고자 하였다.

**핵심어** 원거리진동, 근거리 지중진동, 암반손상, Holmberg모형, 근거리 지중 진동 예측

## 1. 서 론

과거 발파진동의 분석은 대부분이 대상 지장물에

대한 구조적인 피해여부를 확인하기 위해 수행되어져 왔으나, 최근 십수년 동안에는 측정장비 및 분석기술의 끊임없는 발달에 따라 발파공 인접에서의 진동영향을 평가하고자하는 수준에 도달하게 되었다. Table 1에 발파공과 인접하여 수행된 근거리 지중진동의 측정 및 연구결과를 요약 수록하였다.

대상지장물에 대한 영향을 검토하여 분석하는 단계에서는 많은 경험과 기술이 축적되어 이제는 특정기술이 아닌 보편화 된 기술로서 자리매김하고 있으나,

<sup>1)</sup> SK건설 토목사업본부

<sup>2)</sup> 조선대학교 자원공학과 교수

<sup>3)</sup> 조선대학교 자원공학과 교수

\* 교신저자 : hyolee@sk.com

접수일 : 2011년 12월 1일

심사 완료일 : 2011년 12월 20일

게재 승인일 : 2011년 12월 23일

**Table 1.** Damage zone and characteristics of near field vibration(after Ouchterlony et al, 1996, Yang et al, 1993 and Bogdonoff, 1996)

Researchers	Condition of blasting & monitoring			Characteristics of vibration			Damage zone (m)	Comments
	Explosives	Linear charge Density (kg/m)	Distance (m)	Acceleration (m/s <sup>2</sup> )	PPV (m/s)	Frequency (Hz)		
Ouchterlony et al. (1996)	-	-	3.8	-	-	-	0.2~0.5	Tunnel Smooth blasting
Yang et al. (1993)	Magnafrac 100	-	2~15	4,887~93,800	0.36~6.2	5,000~7,000	-	Bench blasting
Rustan et al. (1985)	Pipe charge Detonation cord ANFO	0.18 0.14 0.26	2	-	0.3~0.9	-	0.4~0.5	The lowest measured value of vibration
Bogdanoff (1996)	Detonation cord 22mm Gurit 18mm Gurit ANFO	0.1 0.3 0.18 1.45	0.25, 0.65 1.0, 1.4 1.4 < 2m	-	2.5, 1.6 1.1, 0.6 1.1~1.2 1.2~3.9	< 2,000 < 2,000 2,000~5,000 -	-	Tunnel Smooth blasting
Nie et al. (1996)	Emulan 7500 & ANFO	φ140~311	8~32	-	0.1~0.8	-	-	Weight : diameter Bench blasting

발파공과 인접한 거리에서의 진동특성에 대한 연구는 주로 계측에 대한 방법 및 결과에 집중되어 왔다. 측정결과치는 종래 근거리 영역의 진동을 예측하는데 사용된 Holmberg모델과 종종 비교되어지곤 했다. 이러한 비교연구는 근거리 진동영역의 보다 활발한 연구활동이 가능하게 된 동기부여가 되었고, 근거리 지중진동의 특성을 고려한 새로운 예측방법을 연구하게 된 모태가 되었다(Holmberg et al, 1994).

따라서, 본 연구에서는 발파공과 인접한 근거리 지중진동의 실제측을 통하여 그 특성을 분석하고, 이를 기존 데이터로 활용하여 근거리 지중 진동 예측방법을 제안하고자 하였다.

본 연구에서는 근거리 지중진동의 예측방법으로써 Berta 모델(Berta, 1990)을 활용하도록 하였으며, 이 예측모델을 위해 사용된 기초자료는 실제 근거리 지중진동을 측정된 결과값을 활용하였다.

## 2. 예측모델의 선정

파동의 진행방향과 수직인 단위면적을 통하여 단위 시간당 파동에 의해 운반되는 에너지의 양을 파동의

강도(Intensity)라고 한다. 만약 파동이 속도 C로 계속 진행한다면 단위 부피당 에너지 밀도를 정의할 수 있으며, 이를 탄성매질내의 구면조화파(Spherical harmonic P-wave)에 대하여 단위 부피당 에너지량, 즉, 에너지 밀도로 식 (1)과 같이 표현된다(Berta, 1990).

$$E = 2\pi^2 \cdot \rho_r \cdot f^2 \cdot a^2 \tag{1}$$

따라서, 에너지 밀도와 속도의 곱으로 표시되는 파동의 강도는 식 (2)로 표현되며, 이는 단위시간당 단위면적이 갖게 되는 에너지에 해당된다.

$$E_v = E \cdot C = 2\pi^2 \cdot \rho_r \cdot C \cdot f^2 \cdot a^2 \tag{2}$$

발파에 의한 지중 진동파는 반구상의 전파를 하게 되고, 이 때 진동의 지속시간을  $T_v$ 라 하면, 발파지점으로부터 거리 R에서의 탄성파 에너지는 식 (3)으로 표현될 수 있다.

$$E_v = 2 \cdot \pi \cdot a^2 \cdot f^2 \cdot 2 \cdot \pi \cdot R^2 \cdot \rho_r \cdot C \cdot T_v \cdot 10^{-6} (Mj) \tag{3}$$

또한, 진동의 유효지속 시간을 주기의 5배로 취하면, 식 (4)로 표현할 수 있으며, 이를 다시 식 (3)에 대입하면 식 (5)가 된다.

$$T_v = 5T = \frac{5}{f} \quad (4)$$

$$E_v = 2 \cdot \pi \cdot a^2 \cdot f^2 \cdot 2 \cdot \pi \cdot R^2 \cdot \rho_r \cdot C \cdot \frac{5}{f} \cdot 10^{-6} (Mj) \quad (5)$$

여기에서,  $a$  = 변위(m),  $f$  = 주파수(Hz),  $R$  = 거리(m),  $\rho_r$  = 암석의 밀도(kg/m<sup>3</sup>),  $C$  = 암반의 탄성파 속도(m/sec)

또한, 발파시 사용되는 폭약의 양을  $W$ (kg), 폭약의 kg당 발생하는 에너지를  $E_c$ (Kcal/kg 또는 Mj/kg)라 하면, 폭약의 폭발시 발생하는 총에너지는 다음의 식 (6)으로 나타낼 수 있다.

$$E_{total} = E_c \times W (Mj) \quad (6)$$

이 때 암석에 전달되는 에너지는 폭약의 장약 상황, 즉, Decoupling의 영향 및 폭약과 암반과의 임피던스 차이 등을 고려하여 다음의 식 (7)로 표현할 수 있다.

$$E_r = E_{total} \cdot \eta_1 \cdot \eta_2 (Mj) \quad (7)$$

다음으로 암석에 전달된 에너지 중 탄성에너지, 즉, 발파진동으로 변환되는 에너지는 다음의 식 (8)로 나타낼 수 있다.

$$E_v = \eta_g \cdot E_r = \eta_g \cdot \eta_1 \cdot \eta_2 \cdot E_{total} = \eta_g \cdot \eta_1 \cdot \eta_2 \cdot E_c \cdot W \quad (8)$$

여기에서,  $\eta_1$  = Decoupling effect를 고려한 요소  
 $\eta_2$  = 폭약과 암반의 Impedance를 고려한 요소  
 $\eta_g$  = 탄성에너지의 변화 정도를 규정하는 요소

따라서, 식 (5)와 식 (8)를 이용하면, 지반변위는 식 (9) 또는 식 (10)으로 나타낼 수 있다.

$$a = \sqrt{\frac{\eta_g \cdot \eta_1 \cdot \eta_2 \cdot E_c \cdot W \cdot 10^6}{20 \cdot \pi^3 \cdot f \cdot \rho_r \cdot C \cdot R^2}} (m) \quad (9)$$

$$a = \sqrt{\frac{\eta_g \cdot \eta_1 \cdot \eta_2 \cdot E_c \cdot W \cdot 10^{12}}{20 \cdot \pi^3 \cdot f \cdot \rho_r \cdot C \cdot R^2}} (mm) \quad (10)$$

또한, 발파진동은 변위와 주파수의 함수로써 다음 식 (11)로 표현할 수 있으며, 여기에 식 (10)을 대입하면, 식 (12)와 같다.

$$v = 2\pi \cdot a \cdot f \quad (\text{mm/sec}) \quad (11)$$

$$\begin{aligned} v &= 2\pi \cdot \sqrt{\frac{\eta_g \cdot \eta_1 \cdot \eta_2 \cdot E_c \cdot W \cdot 10^{12}}{20 \cdot \pi^3 \cdot f \cdot \rho_r \cdot C \cdot R^2}} \cdot f \\ &= \sqrt{\frac{\eta_g \cdot \eta_1 \cdot \eta_2 \cdot E_c \cdot W \cdot 10^{12} \cdot f^2}{5 \cdot \pi \cdot f \cdot \rho_r \cdot C \cdot R^2}} \\ &= \frac{\sqrt{W}}{R} \cdot \sqrt{\frac{\eta_g \cdot \eta_1 \cdot \eta_2 \cdot E_c \cdot 10^{12} \cdot f}{5 \cdot \pi \cdot \rho_r \cdot C}} \quad (\text{mm/sec}) \quad (12) \end{aligned}$$

이상과 같은 방법으로 발파진동을 예측평가하는 방식이 Berta의 접근방식이고, 다시 식 (12)를 비례상수  $C$ 를 사용하여 일반식으로 전환시키면, 식 (13)과 같다.

$$v = \frac{\sqrt{W}}{R} \cdot C \quad (13)$$

여기에 본 연구의 취지에 부합되게 계수조정을 실시한 후 다시 각각의 요소로 분리시키면,  $C$  값들은 식 (14)에서 식 (17)와 같으며, 결론적으로 식 (18)와 같다.

$$C_1 = \sqrt{\frac{10^9}{5 \cdot \pi}} \quad (14)$$

$$C_2 = \sqrt{\frac{\eta_g \cdot f}{10^3}} \quad (15)$$

$$C_3 = \sqrt{\eta_1 \cdot \eta_2} \quad (16)$$

$$C_4 = \sqrt{\frac{E_c \cdot 10^6}{\rho_r \cdot C}} \quad (17)$$

$$C = C_1 \cdot C_2 \cdot C_3 \cdot C_4 \quad (18)$$

여기에서,  $C_1$  은 식 (14)의 정의에 따라 계산에 의해 구해지는 상수 값이 되고,  $C_2$  는 실험의 결과로 결정되며,  $C_3$  및  $C_4$  는 상기 식 (16) 및 식 (17)에 의해서 수식적인 계산에 의해 얻어질 수 있으며,  $E_c$ ,  $\rho_r$ ,

C 값은 상수에 해당되고,  $\eta_1, \eta_2$ 는 식 (19), 식 (20)으로 정의된다.

$$\eta_1 = \frac{1}{(e^{\phi_d/\phi_c} - (e-1))} \quad (19)$$

$$\eta_2 = 1 - \frac{(I_e - I_r)^2}{(I_e + I_r)^2} \quad (20)$$

여기에서,  $\phi_f$  = 발파공의 직경(mm)

$\phi_c$  = 폭약의 직경(mm)

$I_e = \rho_c \cdot VOD$

$I_r = \rho_c \cdot C$

$\rho_c$ : 폭약의 밀도( $kg/m^3$ )

VOD: 폭약의 폭발속도( $m/sec$ )

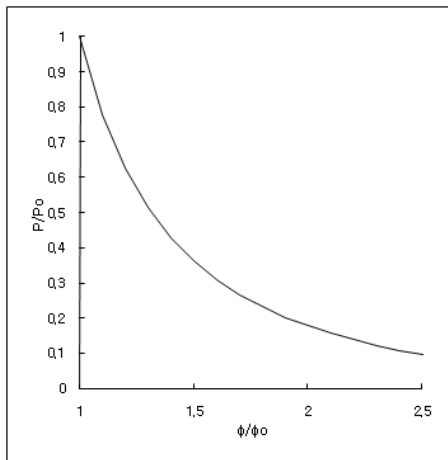


Fig. 1. Variation of dynamic pressure on the side of the holes as a function of the ratio hole diameter to charge diameter.

$\rho_c$  = 암석의 밀도( $kg/m^3$ )

C = 암석의 탄성파 속도( $m/sec$ )

식 (19)의 경우에 Decoupling 계수가 클수록 동적 압력의 감소는 Fig. 1과 같으며, 폭약과 발파공의 직경이 동일한 경우에는 그 값이 1이 되도록 규준화되어 있다.

이러한 접근방식은 우선 식 (13)을 참고하면 진동의 크기는 거리에 반비례하게 되는데, 전술한 지중진동의 특성상 진폭의 크기는  $\frac{1}{r}$ 로 감소한다는 기초이론과도 잘 부합되고 있으며, 또한, Table 2에서 보는바와 같이 실측결과와 학자들에 의해 제시된 결과를 종합하여 볼 때 수공이 가는 바람직한 방법으로 판단된다.

그리고, 본 연구에서 제시된 방법은 발파진동에 영향을 미치는 아래의 몇 가지 사항 모두를 C값에 반영시켜 분석함으로써, 그 신뢰성을 높이고자 하였다.

- ① 단위길이당 장약량의 변화
- ② 거리의 영향
- ③ 디커플링효과에 의한 영향
- ④ 암중에 대한 요소
- ⑤ 폭약의 종류에 대한 요소
- ⑥ ④ 및 ⑤의 동시적인 영향에서 기인하는 임피던스(Impedance)의 영향
- ⑦ 폭약과 암반의 상호작용에 의한 발파진동으로의 탄성에너지의 변화

Table 3에는 이상의 상황을 종합하여 근거리 지중진동의 예측을 위한 해석모델을 종래의 방법과 본 연구에서 수행하고자 하는 방법을 비교·수록하였다.

Table 2. Change of the power, n or  $\beta$ , from distance from blasting source<sup>4),6)</sup>

Distance of source	Shorter distance	2~15m	< 30m	> 30m	Longer distance
n, $\beta$	1.0	1.2931**	1.4***	1.8***	2.0
Type of wave	P-wave (Direct)	Combined wave* (Direct, reflected, refracted, surface etc.,)			

\*Most of the wave types are overlapped at receiver

\*\*After Yang et al. (1994)

\*\*\*After Jap (1994)

Table 3. Comparison with method of expectation of near field vibration

Division	Holmberg's method <sup>1)</sup>	This paper's method**
Prediction of near field vibration	Use of the lower equation $V_{near} = K \left( \frac{l}{r_0} \right)^\alpha \left[ \arctan \left( \frac{H + x_s - x_0}{r_0} \right) + \arctan \left( \frac{x_0 - x_s}{r_0} \right) \right]^\alpha$	Use of equation the lower equation $V = C \cdot \frac{\sqrt{W}}{R}$
Calculation of K-value, $\alpha$ -value	Use of results of surface vibration $V_{far} = K \frac{W^\alpha}{R^\beta}$ K=0.7, $\alpha=0.7$ , $\beta=1.4$ ( $\beta=2\alpha$ )	Use of results of subterranean vibration $C = C_1 \cdot C_2 \cdot C_3 \cdot C_4$
Method of Calculation of K-value, $\alpha$ -value	Regression analysis by results of far field vibration*	C <sub>1</sub> , C <sub>3</sub> , C <sub>4</sub> : by calculation theoretically C <sub>2</sub> : by near field vibration of test blasting really

\*If  $\beta \neq 2\alpha$ , it is insufficient to use the upper equation

\*\*Use of Berta's method modified partially

Table 4. Physical properties of rock of test site

Sample No.	Apparent Density ( $g/cm^3$ )	Absorption (%)	P-Wave velocity (m/s)	Uniaxial Strength (MPa)	Elastic Modulus (GPa)
1	2.683	0.192	5,872	193.0	59.24
2	2.704	0.189	5,978	203.2	59.14
3	2.666	0.224	5,630	161.2	56.39
4	2.671	0.196	5,808	174.0	57.16
Average	0.850	0.000	0	0.00	0.00

### 3. 근거리 지중진동의 계측

본 실험을 위한 시험발파 대상지역은 고속도로 건설공사 현장으로써 굴착 대상암의 대부분은 화강암이 주류를 이루고 있으며, 일부 화강편마암이 편재되어 있는 상황이나, 실제 시험발파가 이루어진 지역은 화강암으로 이루어진 지역이다. Table 4에 본 현장 암석의 물리적 특성을 수록하였다.

Fig. 2는 금번의 시험발파를 위한 천공위치 및 센서의 설치 위치 등을 보여주고 있으며, Table 5에는 각 시험발파의 제원을 수록하였다. 금회에 사용한 화약류는 안포(ANFO), 다이너마이트(dynamite), 에멀전 폭약(emulsion explosive) 및 정밀폭약(Finex-I) 등 총 4개 종류의 제품으로 실험을 실시하였고, 각각의 화약류에 대한 특성은 Table 6에 요약 수록하였다.

Table 7에 본 실험에서 사용한 가속도형 계측센서와 속도형 계측센서의 특성을 비교수록하였고, Fig. 3에는 본 실험에서 사용된 가속도형 계측센서의 모습

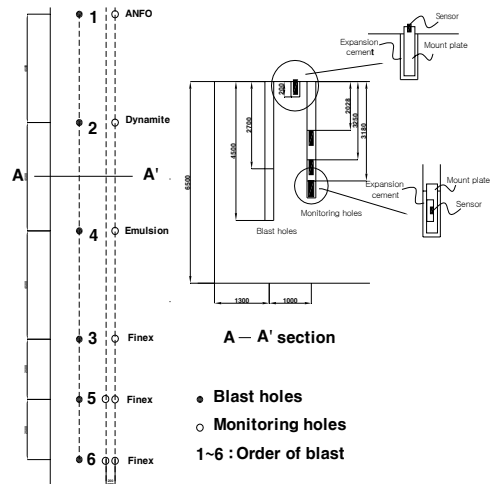


Fig. 2. Experiment design for monitoring vibration.

을 수록하였다. 계측센서의 설치방법에 대한 적정성 평가에 대해서는 Bogdanoff(1996)는 센서의 설치 후

**Table 5.** The pattern of test blasting.

Blast No.	Drilling pattern			Charge pattern					Comments
	Length (m)	Diameter of hole (mm)	Maximum Burden (m)	Type of explosive	Diameter of explosive (mm)	Total weight (kg/EA)	Charge length (m)	Stemming length (m)	
1	4.5	76	2.2	Emulsion + ANFO	50	0.8/1.0 8.0	0.38 2.26	1.86	
4	2.7	76	0.9	Emulsion	50	0.8/1.0	0.38	2.32	
3, 5, 6	2.7	45	0.7	Emulsion + Finex- I	32 17	0.25/1.0 0.40/4.0	0.295 1.70	0.705	Mainly used in Tunnel blasting
2	2.7	76	1.0	Dynamite	50	1.0/1.0	0.40	2.30	

**Table 6.** Properties of explosives

Type of explosive	VOD (m/s)	Density (g/cc)	Gas volume (l/kg)	Energy of explosion (kcal/kg)
Emulsion	5,700	1.1~1.2	826	880
ANFO	3,300	0.75~0.85	970	1,100
Finex-I	4,400	1.0	640	650
Dynamite	6,100	1.3~1.5	880	1,152

**Table 7.** Comparison with accelerometer and velocity monitor

Type of sensor	Application Range	Maximum range		Sampling rate	Unit of out put	Example
		Vibration	Frequency			
Accelerometer	Near field Vibration	50,000g (500km/s <sup>2</sup> )	12~20kHz	25~40ksps	mmV/g V/g	PCB's sensor* Bruel & Kjar
Velocity monitor	Far field Vibration	240mm/s	512Hz	1,024sps	mm/sec cm/sec	Blastmate series

\*Used in this study



**Fig. 3.** PCB's Sensor used in this study.



**Fig. 4.** Foot used in this study.

공진주파수의 검토를 통해 그 적정성을 판단하였으나, 그 외의 연구에서는 이 부분에 대한 언급 없이 실험의 결과만을 보고하고 있다. 본 연구에서는 이 부분에 대한 적정성의 평가를 위해

지표 진동과 지중진동을 동시에 계측하였으며, 지표 진동과 지중진동의 변화양상을 검토하여 동일한 성향을 보이는 경우에는 적절한 계측이 실시된 것으로 판단하였다.

Fig. 4에는 지중진동 측정을 위해 사용된 고정판을 보여주고 있으며, 이들 고정판에는 본 연구에서 사용하고자 하는 센서가 부착되도록 직경 3mm의 센서부착구멍(screw hole)을 만들고 여기에 센서를 나사형태로 고정하도록 하였으며, 지중진동의 측정을 위한 고정판에는 PVC 파이프가 나사형태로 고정이 가능



Fig. 5. The process of inserting Al-foot's sensor into the bore hole.

하도록 외부에 나사산을 제작하였다.

이들 센서가 부착된 고정판을 계측공에 고착시키기 위해서 팽창성시멘트(레진)를 사용하였으며, Fig. 5~ Fig. 6은 이들이 설치된 모습 및 설치과정을 보여주고 있다.

4. 계측결과

본 연구에서 ANFO, 다이나마이트, 에밀전 폭약 및 정밀폭약 등의 폭약을 이용한근거리 진동측정결과



Fig. 6. The sensor appearance inserted into the bore hole.

Table 8. Results of measured vibration

Test No.	Condition of blasting & monitoring				Characteristics of vibration			Comments
	Explosives	Linear charge Density (kg/m)	Weight (kg/hole)	Distance (m)	Acceleration (m/s <sup>2</sup> )	PPV (m/s)	Frequency (Hz)	
1	ANFO	3.5	8.8	1.0	58,619	4.28	4,000~5,000	Booster: Emulsion 1kg
2	Dynamite	2.5	1.0	1.0	38,064	1.41	4,000~5,000	
3	Finex-I	0.2	0.65	1.0	28,195	0.92	1,200~4,000	Booster: Emulsion 0.25kg
4	Emulsion	2.1	0.8	1.0	34,257	1.23	4,000~5,000	

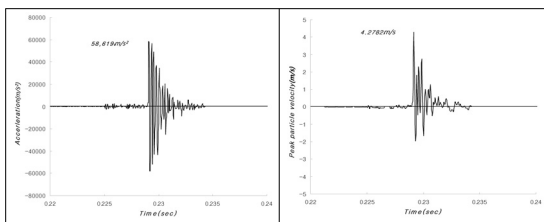


Fig. 7. Vibration time history of test No. 1 using ANFO.

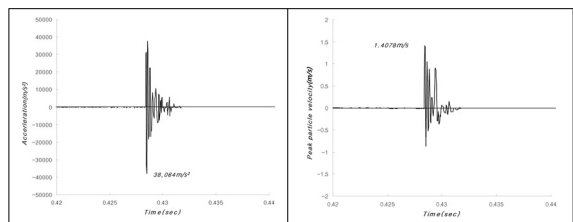


Fig. 8. Vibration time history of test No. 2 using Dynamite.

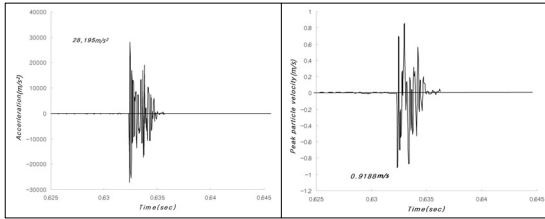


Fig. 9. Vibration time history of test No. 3 using Finex-I.

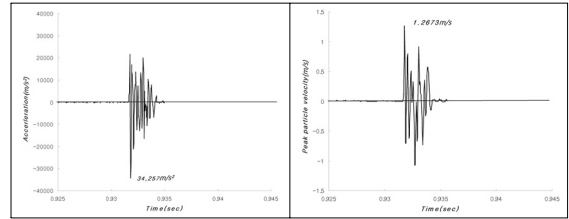


Fig. 10. Vibration time history of test No. 4 using Emulsion.

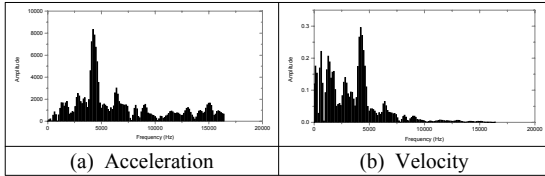


Fig. 11. FFT analysis of test No. 1 using ANFO.

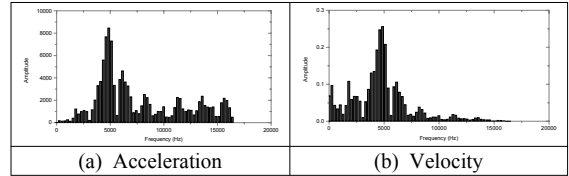


Fig. 12. FFT analysis of test No. 2 using Dynamite.

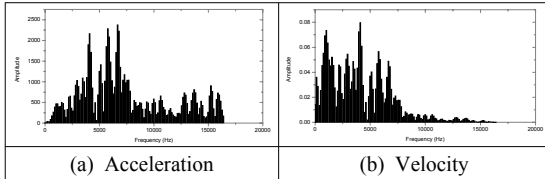


Fig. 13. FFT analysis of test No. 3 using Finex-I.

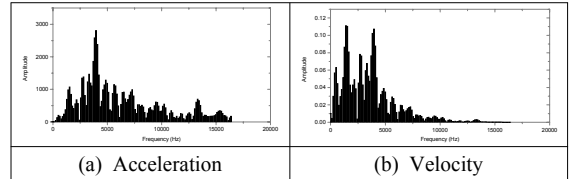


Fig. 14. FFT analysis of test No. 4 using Emulsion.

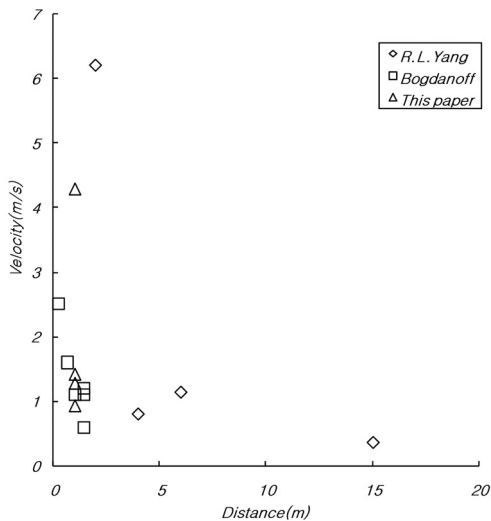


Fig. 15. Comparison with results of near field vibration.

Table 8과 같으며, 각각의 진동 파형 및 최고값은 Fig. 7~Fig. 10에 수록하였고, 각각의 경우에 주파수 특성은 Fig. 11~Fig. 14와 같다.

ANFO의 경우 진동속도가 4.2782m/s, 진동가속도가 58,619m/s<sup>2</sup>로 계측되었으며, 다이너마이트의 경우는 진동속도가 1.4078m/s, 진동가속도가 38,064m/s<sup>2</sup>로 계측되었고, 정밀폭약은 진동속도가 0.9188m/s, 진동가속도가 28,195m/s<sup>2</sup>로 계측되었으며, 에멀전은 진동속도가 1.2673m/s, 진동가속도가 34,257m/s<sup>2</sup>로 계측되었다.

각각의 주파수 특성은 ANFO, 다이너마이트, 에멀전의 경우 대체적으로 우세주파수가 4,000~5,000Hz의 범위가 지배적인 것으로 나타났고, 정밀폭약의 경우 1200~4000Hz인 것으로 나타났다.

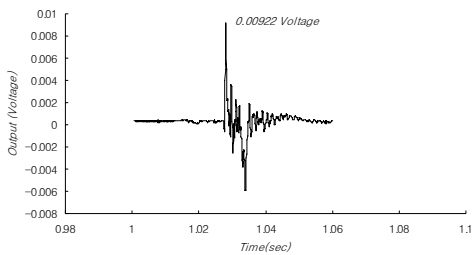
Table 1에 나타나있는 종래의 학자들의 시험결과를 참고하면, 본 연구에서 획득한 시험결과와 큰 차이는 없는 것으로 검토되었으며, Table 9 및 Fig. 15에는 이들의 결과치와 본 연구에서 얻어진 결과치를 비교하여 수록하였다.

또한, 지중진동 측정을 위해 삽입된 센서설치의 적정성 평가를 위해 정밀폭약을 이용하여 2회의 시험발파를 실시하였으며(Fig. 2에서 5, 6회 발파), 이 결과

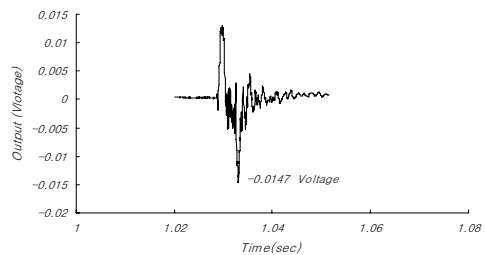


**Table 9.** Comparison with results of near field vibration (after Ouchterlony et al, 1996, Yang et al, 1993 and Bogdonoff, 1996)

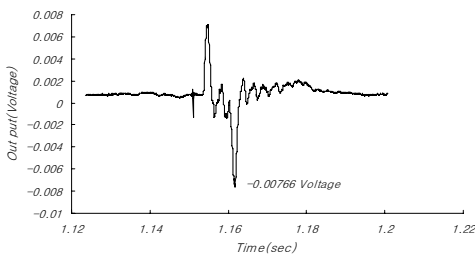
Researchers	Condition of blasting & monitoring			Characteristics of vibration			Comments
	Explosives	Linear charge Density (kg/m)	Distance (m)	Acceleration (m/s <sup>2</sup> )	PPV (m/s)	Frequency (Hz)	
R.L.Yang et al.	Magnafrac 100	-	2~15	4,887~93,800	0.36~6.2	5,000~7,000	Bench blasting
Rustan et al.	Pipe charge Detonation cord ANFO	0.18	2	-	0.3~0.9	-	The lowest measured value of vibration
		0.14					
		0.26					
Bogdanoff	Detonation cord 22mm Gurit 18mm Gurit ANFO	0.1	0.25, 0.65	-	2.5, 1.6	< 2,000	Tunnel  Smooth blasting
		0.3					
		0.18	1.4		1.1, 0.6	< 2,000	
		1.45	< 2m		1.1~1.2	2,000~5,000	
This study	ANFO Dynamite Finex- I Emulsion	3.534	1.0	58,619	4.2782	4,000~5,000	Booster: Emulsion 1kg Booster: Emulsion 0.25kg
		2.5	1.0	38,064	1.4708		
		0.235	1.0	28,195	0.9188		
		2.105	1.0	34,257	1.2673		



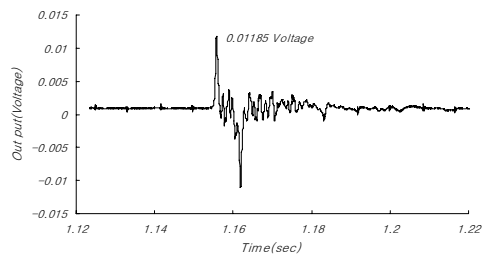
(a) Vibration by test5 (up).



(b) Vibration by test5 (down).



(c) Vibration by test6 (up).



(d) Vibration by test6 (down).

**Fig. 16.** Wave test of near field vibration.

치는 Fig. 16 및 Table 10에 수록하였으며, 동일 조건 하에서 지표 진동과 지중진동의 차이는 약 35.4~37.3%의 범위에서 1.9%의 편차를 보이고 있지만, 대

체적으로 양호한 것으로 판단되므로 지중 센서의 설치는 적절하게 이루어졌다고 판단된다.

**Table 10.** Results of sensor test of near field vibration

No. of test	Vibration(Voltage)		Ratio (①/②)
	Up(①)	Down(②)	
Test 5	0.00922	-0.01470	0.627
Test 6	-0.00766	0.01185	0.646

**Table 11.** Results of C-value

Kind of explosives	C-value				
	C1	C2	C3	C4	C
ANFO	8,000	0.471	0.704	0.543	1,440
Dynamite	8,000	0.550	0.575	0.556	1,407
Finex- I	8,000	1.453	0.235	0.417	1,139
Emulsion	8,000	0.663	0.549	0.486	1,414

### 5. 근거리 지중진동 예측식의 유도

금번의 시험발파 결과 계측된 진동측정치 및 거리, 폭약량을 식 (13)에 대입하면 전체적인 C값을 얻게 된다. 암석의 물성자료는 Table 4를 참고하고, 이 때 사용된 폭약의 특성은 Table 6을 참고하여 식 (14), 식 (16), 식 (17)을 이용하여 C<sub>1</sub>, C<sub>3</sub>, C<sub>4</sub> 값을 구한 후 이를 식 (18)에 대입하면 목표하는 C<sub>2</sub> 값을 얻게 된다.

본 실험의 결과로써는 안포(ANFO)의 C<sub>2</sub>값은 0.472, 다이내마이트(dynamite)는 0.550, 에멀전 폭약(emulsion explosive)이 0.663, 정밀폭약(Finex-I)이 1.453으로 확인되었다.

이상의 사항을 종합하여 Table 11에 각각의 C값을 수록하였으며, 이 후의 근거리 지중진동의 예측식은 Table 12와 같이 설정할 수 있으며, C<sub>3</sub> 및 C<sub>4</sub> 값은 현장의 암반상황이나 장약상황 등 따라 식 (16) 및 식 (17)에 의하여 계산에 의해 구한 후 적용하도록 한다.

### 6. 결론

발파진동에 큰 영향을 미치는 인자로서 단위길이당 장약량의 변화, 거리의 영향, 디커플링효과에 의한 영향, 암반의 탄성과 속도 및 비중, 폭약의 특성, 폭약과 암반과의 임피던스 차이, 폭약과 암반의 상호작용에 의한 발파진동으로의 탄성에너지의 변화 등을 제시할 수 있다.

본 연구에서는 이들 영향인자 모두를 수용하고자

**Table 12.** Prediction of near blast vibration level using C-value

Kind of explosives	Equation of expectation vibration near blast hole
ANFO	$v = (8,000) \cdot (0.471) \cdot C_3 \cdot C_4 \cdot \frac{\sqrt{W}}{R}$
Dynamite	$v = (8,000) \cdot (0.550) \cdot C_3 \cdot C_4 \cdot \frac{\sqrt{W}}{R}$
Finex- I	$v = (8,000) \cdot (1.453) \cdot C_3 \cdot C_4 \cdot \frac{\sqrt{W}}{R}$
Emulsion	$v = (8,000) \cdot (0.663) \cdot C_3 \cdot C_4 \cdot \frac{\sqrt{W}}{R}$

하는 관점에서 Berta모형을 활용하였고, 여기에서 필요한 요소는 전술한 바와 같이 직접적인 근거리 진동 계측을 통해 확인하고자 하였다.

본 연구에서 수행된 근거리 진동계측은 안포, 다이내마이트, 에멀전 폭약, 정밀폭약의 모두 4종류의 폭약을 이용하여 수행하였고, 지중에 설치된 진동 계측 센서 설치의 적정성 평가는 근거리 지표 진동과 동시에 계측을 실시하여 그 변화양상을 검토하여 검증하도록 하였다.

이상의 실험결과를 요약하면 다음과 같다.

- 1) 금번의 연구에서 수행된 4회의 근거리 진동측정 결과는 ANFO의 경우 진동속도가 4.2782m/s, 진동 가속도가 58,619m/s<sup>2</sup> 로 계측되었으며, 다이내마이트의 경우는 진동속도가 1.4078m/s, 진동가속도가 38,064m/s<sup>2</sup>로 계측되었고, 정밀폭약은 진동속도가 0.9188m/s, 진동가속도가 28,195m/s<sup>2</sup>로 계측되었으며, 에멀전은 진동속도가 1.2673m/sec, 진동가속도가 34,257m/sec<sup>2</sup>로 계측되었다. 각각의 주파수 특성은 대체적으로 4,000~5,000 Hz의 범위가 지배적인 것으로 검토 되었다.
- 2) 지중진동 측정을 위해 삽입된 센서설치의 적정성 평가를 위해 정밀폭약을 이용하여 2회의 시험발파를 실시하였으며, 동일 조건 하에서 지표 진동과 지중진동의 차이는 약 35.4~37.3%의 범위에서 1.9%의 편차를 보이고 있지만, 대체적으로 양호한 것으로 판단되므로, 지중 센서 설치는 적절하게 이루어졌다고 생각된다.
- 3) 본 시험발파로부터 계측된 진동측정값 및 거리, 폭약량을 이용하여 전체적인 C값을 얻은 후 암석의

물성자료 및 폭약의 특성을 참고하여 목표하는 최종적인  $C_2$  값을 구하였으며, ANFO는 0.472, 다이너마이트는 0.550, 에멀전이 0.663, 정밀폭약은 1.453으로 확인되었다.

향후 보완될 사안으로는 센서설치의 적정성 여부인데, 금번의 연구에서는 주어진 동일한 조건에서 상대적인 비교로만 가능하였지만, 이 부분에 대해서는 더욱 많은 연구가 이루어져야 할 것으로 판단된다.

### 참고문헌

1. Persson, P., Roger Holmberg and Jaimin Lee, 1994, Rock blasting and explosives engineering, CRC press, pp. 244-245.
2. Berta G., 1990, Explosives: An engineering tool, La Moderna, Novara, pp. 116-131.
3. Ouchterlony, F., S. Nie, U. Nyberg and H. Deng, 1996, Monitoring of large open cut rounds by Vod, PPV and gas pressure measurement, Proc. 5th International symposium on rock fragmentation by blasting, Montreal, Canada, pp. 167-176.
4. Yang R.L., P. Rocque, P. Katsabanis and W.F. Bawden, 1993, Blast damage study by measurement of blast vibration and damage in the area adjacent to blast hole, Proc. 4th Int. Symp. on Rock Fragmentation by Blasting, Vienna, Austria, pp. 137-144.
5. Bogdanoff, 1996, Vibration measurement in the damage zone in tunnel blasting, Proc. 5th International symposium on Rock fragmentation by blasting, Montreal, Canada, pp. 177-185.
6. 잡후겸, 발파공해의 영향과 대책, 1994, 원기술, 서울, pp. 36-38.



**이 효**

SK건설 총무부회장

Tel: 02)3700-9348

E-mail: hlee@skec.co.kr



**강 추 원**

조선대학교 에너지자원공학과 교수

Tel: 062)230-7117

E-mail: cwkwang@chosun.ac.kr



**고 진 석**

조선대학교 에너지자원공학과 교수

Tel: 062)230-7118

E-mail: jsgo@chosun.ac.kr