

발파공 주변의 인접거리 진동계측 사례연구
A example study on monitoring near field vibration
in the rock mass adjacent blast hole

이 효¹⁾, 원연호²⁾, 김진수³⁾, 주영옥⁴⁾
Hyo Lee, Yeonho Won, Jinsoo Kim, Youngog Ju

초 록

종래의 발파진동의 분석은 주로 대상 지장물에 대한 피해한계를 정립시키고자 하는 관점에서 발파공에서 비교적 원거리의 진동특성을 이해하기 위해 수행되어져 왔으나, 최근의 추이는 발파공 주변 암반의 손상의 정도를 평가하고자 하는 관점에서 그 분석영역의 범위가 근거리 진동특성 연구분야로 확대되고 있는 실정이다.

특히, 터널 발파작업시 여굴의 발생, 암반사면의 안정성 검토 등의 목적으로 암반의 손상영역을 평가하는데 있어서, 기초자료로 활용하고자 많은 연구가 이루어지고 있다.

암반손상의 평가를 위한 손상권 예측방법에는 여러 가지가 있으나, 그 중에서 대부분이 발파진동속도에 근거하고 있으며, 평가를 위한 진동의 예측은 기존에는 원거리 진동특성을 이용하여 근거리 진동을 예측하는 방법으로 그 손상의 정도를 평가하였으나, 최근의 추세는 계측기의 발달로 수m 이내의 진동특성의 계측이 가능하게 되었다.

이와 관련하여 국외에서는 수차례의 실험결과가 여러 문헌에서 보고되고 있으나, 실험장비의 선택 및 측정방법의 어려움 등의 연유로 국내에서는 아직까지 실시되지 못하고 있는 상황이다.

따라서, 본 연구에서는 실제 발파공 근접진동(near field vibration) 계측을 실시하고 그 결과를 분석하여 추후 지속적인 근거리 진동측정 방법 및 평가방법에 대한 기초자료를 제공하고자 하였으며, 무엇보다도 어떻게 계측할 것인가 하는 계측방법 및 그 계측결과의 분석방법에 대해 문제점 파악 및 향후 보완점에 대해 비중을 두어 수행하였다.

-
- 1) SK건설(주)
 - 2) 원앤비(주)
 - 3) 원화건설(주)
 - 4) 티엔알비(주)

1. 개 요

중대 암반의 손상영역을 평가하는 방법에 있어서는, 원거리 진동(far field vibration)특성을 이용하여 평가하는 방법이 실용적인 측면 내지는 실험의 용이성 등의 연유로 많이 이용되어 왔다.

그러나, 최근에 보고된 실험결과에서 직접적인 근거리 진동(near field vibration)의 측정결과와 전술한 원거리 진동측정 방법에 의한 평가결과의 비교연구가 이루어져 그 타당성에 대해서는 새로운 문제로 부각되고 있는 실정이고, 이러한 관점에서 여러 학자들에 의해 근거리 진동측정이 수행되어야 왔으며, 각 학자들마다의 측정결과를 Table 1에 요약 수록하였다.

대표적으로 몇 가지 경우를 살펴보면 Yang et al. 등¹⁾은 발파공에서 15m 이내는 근거리 진동(near field vibration), 15m 이상은 원거리 진동(far field vibration)으로 구분하여 근거리 진동특성을 연구하였으며, 진동 가속도 성분에 대한 주파수 분석 결과 주주파수는 발파공과 이격거리 4m, 15m의 거리에서 각각 5,000Hz, 7,000Hz인 것으로 검토되었고, 2~15m의 범위에서 진동 가속도의 측정범위는 93,800~4,887m/sec², 진동속도의 측정범위는 6.2~0.36m/sec인 것으로 그 실험자료를 제시하고 있다.

Bogdanoff²⁾는 여러 종류의 폭약을 이용하여 터널의 외곽공 및 외곽 보조공의 진동 계측을 실시하였는데 측정결과 발파공에서 0.25~2.0m의 거리에서 0.6~3.9m/sec의 진동속도를 계측하였으며, 주파수의 범위는 약 2,000~5,000Hz인 것으로 보고하고 있다.

Rustan 등²⁾은 발파공으로부터 2m거리에서 0.3~0.9m/sec의 진동속도가 계측된 것을 보고하고 있으며, S.Nie & J.Deng³⁾ 등은 발파공으로부터 8~32m의 범위에서 약 0.1~0.8m/sec의 진동계측을 실시한 것을 보고하고 있다.

Table 1 Characteristics of near field vibration monitored bysearchers

Researchers	Condition of blasting & monitoring			Characteristics of vibration		
	Explosives	Weight (kg/m)	Distance (m)	Acceleration (m/s ²)	PPV (m/sec)	Frequency (Hz)
Nyberg & Ouctherlony	-	-	3.8	-	-	-
R.L.Yang et al.	Magnafrac 100	-	2~15	93,800~4,887	6.2~0.36	5,000~7,000
Rustan et al.	Pipe charge Detonation cord ANFO	0.18 0.14 0.26	2	-	0.3~0.9	-
Bogdanoff	Detonation cord	0.1	0.25, 0.65	-	2.5, 1.6	-
	22mm Gurit	0.3	1.0, 1.4	-	1.1, 0.6	-
	18mm Gurit ANFO	0.18 1.45	1.4 <2m	-	1.1~1.2 1.2~3.9	-
S.Nie & J.Deng	Emulan 7500 & ANFO	φ140~311	8~32	-	0.1~0.8	-

2. 근거리 지중진동의 계측방법

발파공 인근의 근거리 지중 진동은 원거리 지표 진동과 비교시 진동의 크기도 많은 차이가 있지만, 계측에 있어서 더욱 중요한 것은 주파수 특성이다.

Table 1을 참고하면 주주파수의 범위가 5,000~7,000Hz의 범위에 이르고 있지만, 이는 주파수의 범위가 되므로 실제로는 이 이상의 고주파 성분도 존재하고 있다.

계측에 앞서 가장 중요한 것은 진동을 샘플링(Sampling)할 수 있는 적절한 진동 센서(Sensor)를 선택하는 일인데, 대체적으로 진동의 크기와 주파수 특성을 고려하여 선택하여야 한다.

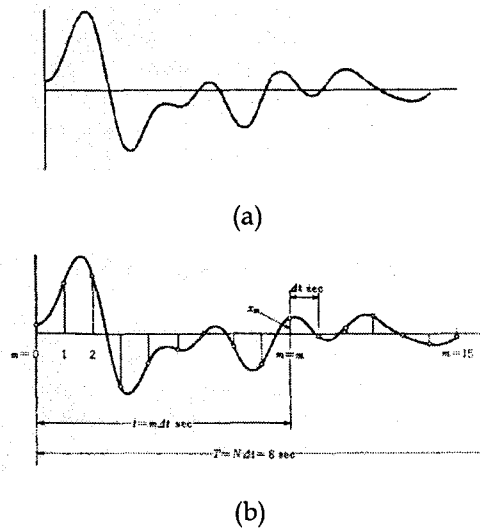


Fig. 1 Sampling method of Digital data

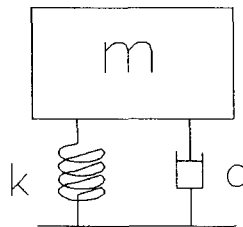


Fig. 2 SDF System of Pick-up

그 다음 샘플링 된 Data를 기록할 수 있는 기록장치(Recorder)도 중요하다. 이러한 제반적인 조건이 발생되는 진동의 특성과 일치하여야만이 비로소 정확한 계측이 가능하게 되므로, 우선적으로 기록의 디지털화 되는 기초적인 개념을 이해할 필요가 있다.

이를 위해 지금, Fig. 1(a)에 간단한 예제파를 도시하였다. Fig. 1(a)에서 보는바와 같이 이 기록은 연속된 매끄러운 곡선이다. 이러한 파를 스펙트럼 해석할 때 매끄러운 곡선 그대로 취급하는 방법을 아날로그(Analog)해석이라 한다.

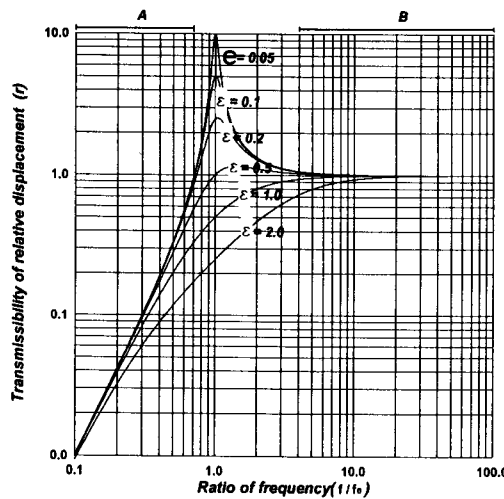


Fig. 3 Transmissibility of relative displacement according to ratio of frequency

예를 들면 Fig. 1(a)곡선을 광전관을 이용한 장치를 이용하여 연속적으로 매끄러운 전압으로 바꾸고 그 전압을 전기회로에 넣어 전기적으로 해석하고 그 결과도 전기적으로 움직이는 펜으로 매끄러운 연속곡선으로 종이에 그리는 방법이 이에 속한다.

이에 비해 또 하나의 방법은 Fig. 1(b)와 같이 어느 일정간격마다 파형을 수치로 읽고, 읽어 들인 수치에 대해 수치해석을 하는 방법이 있다. 이와 같은 방법을 디지털 (Digital)해석이라 한다. 읽어 들인 수치는 연속량이 아닌 이산화 된 값이다. 이러한 량을 연속량에 비교하여 이산량이라하며, 원래의 연속량을 이산량의 수열로 고치는 것을 디지털 화라고 한다.

보통 저속도 형 센서의 경우 $\Delta t = 0.01\text{sec}$ 로 하므로, 예를들면 지속시간 $T=10\text{sec}$ 의 파형의 경우 읽는 갯수는 $T/\Delta t = 1,000$ 개가 된다. 연속된 아날로그량을 이산적인 디지털량으로 바꾸는 장치를 Analog와 Digital 각각의 머리문자를 따서 A-D변환장치(A-D converter)라 한다.⁴⁾

또한, 어떤 연속 신호를 아날로그-디지털 변환에 의하여 시계열로 바꿀 때 샘플링 간격을

어떻게 취하느냐에 따라 본래 신호에 포함되어 있는 정보의 일부를 잃어버리는 경우가 생기게 되는데, 적어도 식(1)로 정의 되는 나이퀴스트 주파수 또는 폴딩 주파수라 불리는 범위 이상의 것이 필요하게 된다.⁵⁾

$$f_N = \frac{1}{2 \cdot \Delta T} \dots\dots\dots(1)$$

단, 여기서 ΔT 는 Sampling 되는 시간간격이다.

예를 들면, 현재까지 실험에 의한 발파공 인근의 최대 주주파수 범위는 8,000Hz에 이르고 있고, 대체적으로 최대 주주파수 범위의 2배를 계산하면, 16KHz까지 측정가능한 범위의 것이 선택되어야 한다. 따라서, 식(1)에서 $f_N = 16,000\text{Hz}$ 로 하면, $\Delta T = 0.00003125\text{sec}$ 가 된다. 이는 Fig. 1(b)에서 1번과 2번 지점의 시간간격을 의미하게 된다. 바꾸어서, 진동센서의 샘플링 간격(ΔT)을 알게 되면은 식(1)을 이용하여 측정 가능한 주파수 범위도 계산되어지며, $\frac{1}{\Delta T}$ 를 샘플링 비율(Sampling rate)라 표현하고, 이 경우에 초당 32,000개의 샘플을 표시할 수 있다는 의미가 된다. 따라서, 이 범위에 해당되는 센서 및 레코더를 선택하여 사용하여야 한다.

다음은, 측정되는 진동의 물리량을 어느 것으로 선택할 것인가에 대한 문제가 있는데, 진동센서의 고유 주파수를 f_0 라 할 때, $\frac{f}{f_0} < 1$ 의 영역에서는 가속도형 센서가 사용되며,

$\frac{f}{f_0} > 1$ 의 영역에서는 속도형 진동센서가 사용된다. 따라서, 고주파의 영역의 진동측정을 대상으로 하는 경우에는 가속도계 센서가 사용되어진다.

좀 더 진동 픽업의 원리를 살펴보면, 1자유도만을 고려되는 일반적인 진동계의 픽업은 Fig. 2에서 보여주는 바와 같이 모식화 될 수 있으며, 질량이 용수철과 저항(일반적으로는 속도에 비례하는 저항)으로 지지되어 있고, 이 기초가 위아래 방향으로 진동하는 측정위치에 강하게 결합되어 있다.

여기에서, x_0 는 진동체의 진동변위를 나타내고, x 는 추와 강체와의 상대변위로 할 때, $\frac{x_0}{x}$ 는 상대변위의 전달율 γ 이며, 이는 식(2)로 나타낼 수 있다.

$$\gamma = \sqrt{\frac{\left(\frac{f}{f_0}\right)^4}{\left(1 - \left(\frac{f}{f_0}\right)^2\right)^2 + \left(2\xi \frac{f}{f_0}\right)^2}} \dots\dots\dots(2)$$

식(2)를 그래프에 도시하면 Fig. 3과 같다. 고유진동수를 f_0 라고 하고, 진동체의 진동수 f 와의 비 $\frac{f}{f_0}$ 와 γ 와의 관계에서, $\frac{f}{f_0} \ll 1$ 의 조건을 대입하고, Fig. 3을 참고하면, $\gamma = \frac{x}{x_0} = \left(\frac{f}{f_0}\right)^2$ (Fig. 3의 'A')이 되며, 상대변위 x 가 절대변위 x_0 의 $f^2(\propto \omega^2)$ 배에 비례하게 되고, $x_0\omega^2$ 은 진동가속도 이므로 상대변위가 절대진동 가속도에 비례하게 된다.

따라서, 상대변위가 전기출력에 비례하는 발전기구의 진동픽업인 경우에는 진동가속도 입력에 대하여 전기출력이 비례하는 가속도형 픽업이 되며, 고유진동수 f_0 가 높은 진동수가 되도록 압전소자로 Fig. 2의 용수철을 구성하고 있는 압전형 직동픽업이 여기에 속하게 된다.

또한, $\frac{f}{f_0} \gg 1$ 의 영역에서는, $\gamma = 1$ (Fig. 3의 'B')이 되고, 절대변위와 상대변위가 같게 된다. 상대변위에 비례하는 전기출력을 얻는 기구로 하면, 변위형 픽업이 되는데, 고유진동수 f_0 를 충분히 낮게 구성한 픽업의 경우에는 코일을 지나는 자속변화에 비례하는 출력전압을 얻게 되는데, 즉, 변위의 시간변화(=속도)에 상당한 출력이 되므로, 본질적으로는 변위형 픽업이지만, 속도형 픽업으로 된다.⁶⁾

전술한 바와 같이 현재 국내에서 대표적으로 상용화 되어 있는 Blastmate series의 진동 센서가 속도형 픽업에 해당되며, 측정 가능한 최대 주파수는 520Hz이다.

이상의 검토 결과를 종합하면, 발파공 인근의 진동수는 그 주파수 특성이 적어도 수KHz ~ 수십KHz 범위의 고주파 영역에 해당되므로, 이에 적합한 를 가진 가속도형의 진동센서가 필요하게 되고, 이러한 조건에서는 주로 압전형 가속도계가 사용되며, 최종적으로는 수치 적분으로 속도로 변환시켜 목적하는 진동 측정값을 얻게된다.

종래의 실험결과를 살펴보면 최대 주파수는 8,000Hz에 이르고 있으므로, 이 영역의 2배 를 취하면 약 16KHz가 되는데, 이 값이 바로 측정하고자 하는 주파수 f 에 해당되며,

Table 2 Specifications of accelerometers

Researchers	Maximum Range		Sampling Rate	Unit of Output
	Vibration	Frequency		
R.L.Yang et al.	50,000 g 500Km/ ⁻²	20.0KHz	40K sps	mmV/g
Bogdanoff	25,000 g 250Km/ ⁻²	16.5KHz	33K sps	mmV/g
S.Nie & J.Deng	900 g 9Km/ ⁻²	12.5KHz	25K sps	mmV/g

Table 3 Specifications of accelerometers used in this study

Type of sensor	Maximum range		Sampling rate	Unit of out put
	Vibration	Frequency		
Accelerometer	50,000 g (500Km/ ⁻²)	16KHz	32K sps	mmV/g V/g

센서가 같게 되는 고유진동수는 $\frac{f}{f_0} \ll 1$ 의 조건에서 적어도 16KHz 이상의 것이 필요로 하고, 이러한 고주파 영역의 진동을 계측하기 위해서는 센서의 크기가 작아야 한다. 센서의 크기가 크고 무거울수록 저주파형의 진동을 계측하기 적합하다.

Table 2에는 전술한 학자들의 실험조건에 따른 계측센서의 특성을 요약하여 수록하였으며, Table 3에는 본 연구에서 사용된 계측센서의 특성을 요약 수록하였다.

3. 진동계측

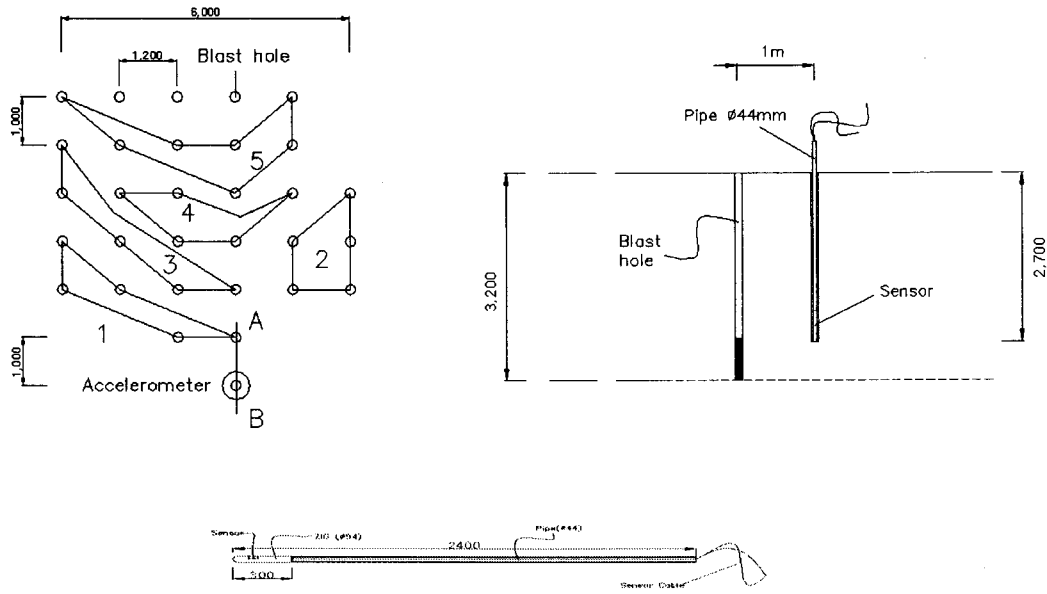
당일 시험을 위한 발파는 총 5회에 걸쳐 실시되었으며, 천공장은 모두 3.2m로 동일하게 적용하였고, 천공경은 76mm, 최소저항선 및 공간격은 1.0~1.2m로 하였다.

당일 사용된 폭약은 Newmite plus I의 에멀전계 폭약을 사용하였으며, 뇌관은 MS 뇌관을 사용하였고, 공당 장약량은 1~3회차는 1.2kg, 4~5회는 1.0kg를 사용하였다.

Table 4 에는 발파패턴의 제원을 수록하였으며, Fig. 4는 천공배치와 계측기 설치위치 및

이효, 원연호, 김진수, 주영욱

설치방법을 보여주고 Fig. 5에는 센서의 외형 및 고정 방법 및 계측장치를 보여주고 있다.



(a) Plan View

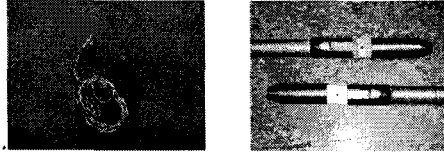
(b) Section View(A-B from (a))

(c) Method of mounting sensor

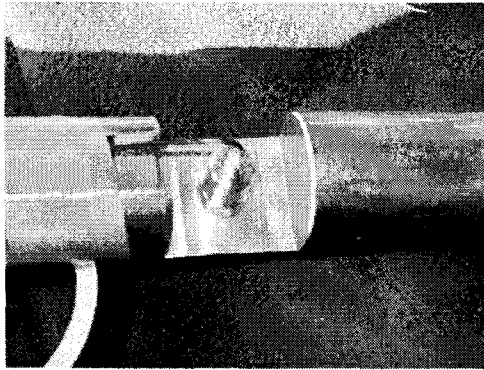
Fig. 4 Method of mounting sensor and Plan & Section View

Table 4. The Pattern of blasting used in this study

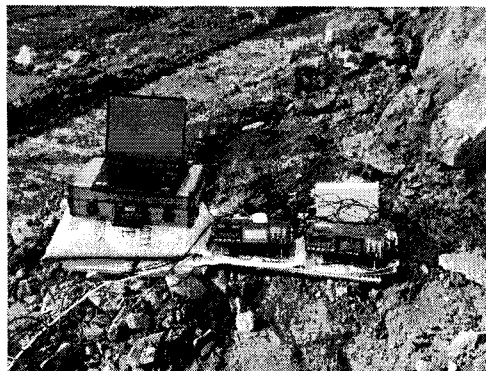
No. of Blast	Drilling Length (m)	Burden & Spacings (m)	Number of holes	Max. charge (kg/delay)
1~3	2.7	1.0	5	0.8
4~5	2.7	1.0	5	1.2



(a) Type of sensor and mount



(b) Method of mounting sensor



(c) Signal Analyzer

Fig. 5 Method of mounting sensor and
Signal Analyzer

4. 계측자료의 분석

Table 5는 당일 시험 발파시 근거리에서 측정된 결과치를 수록하였고, 이 때, 측정되는 Data의 원본 값은 전압의 형태로 출력 되므로 이를 가속도로 환산한 값이다.

진동속도값의 경우 금번 실험에서는 변환을 실시하지 않았으나, 관련 Software(PULSE LabShop, Ver. 7.0, Bruel & Kjaer)를 활용하면 쉽게 구할 수 있다.

Fig. 6, 7에는 당일 계측시 가장 근접한 지점에서의 측정된 파형을 보여주고 있다. 보다 자세히 파형을 확인하기 위해 횡축의 Scale을 확대하면 Fig. 8, 9와 같다.

Fig. 8, 9를 살펴보면, 고주파 영역의 진동파형 이외에도 저주파 형태의 파형이 폭넓게 관찰 되는데 이는 센서를 고정시키기 위해 사용된 강철 Pipe의 종방향의 진동에 기인한 것으로 보인다. 또한, 당일 시험 측정시에 계측공과 센서사이의 공간을 현장 여건상 모래로 충진 하였으므로, 물질의 진동 전파특성인 임피던스(Impedance)의 차이도 고려되어야 할 것으로 판단된다.

또한, 당일 실험의 계획단계에서, 여러공을 동시에 기록하여 뇌관의 시차가 20ms이므로 각각의 독립된 파형을 기대하였지만, 실제 측정결과로는 구분하기 어렵게 되었다.

단순히 계측된 값만을 가지고 종래의 측정값과 비교하는데는 무리가 있어 보이며, 실제 당일 계측시의 여러 가지 현장 변화요소를 충분히 고려되지 않은 상황이므로 추후 보다 정밀한 계측을 요하는 경우에는 몇 가지 보완할 필요가 있다고 판단된다.

Table 5. Results of near field vibration

Distance Out Put (Vibration)	1m	2.33m	2m	3m	4m
Voltage(V)	0.01476	0.003065	0.00922	0.00395	0.00396
Acceleration(g)	129.7	27.1	81.6	34.9	35.0
Acceleration (m/sec ²)	1,271.1	265.8	799.6	342.6	343.6

금번의 실험 결과로써 이러한 보완해야 할 사안을 요약하면 다음과 같다.

① 센서의 고정방법

어떻게 고정시킬 것인가 하는 문제와 고정시킬 때 사용되는 재료(예를 들면, 시멘트 모르타르 등)의 임피던스의 형평성을 어떻게조율할 것인가 등의 문제가 있다고 본다.

② 동시 다수 발파공의 영향

여러공의 동시 기폭시에는 각 공마다 순간 기폭파형을 독립적으로 분리시켜 계측하기는 어려운바 이점을 감안하여 단일공 기폭이 바람직하다고 판단된다.

③ 전파되는 진동파의 조합 및 분산의 영향

전파되는 진동파가 여러 조합파로써 계측되는 경우에는 실제로 요구되는 순수한 종파의 진동만을 계측하기 어려운바, 이 점을 감안하여 현장의 여건이 가급적이면 신선한 암반쪽이 바람직하다고 판단된다.

또한, 계측방법이 당일 실험과 동일하게 동일 측선상의 배치방법은 파형의 분산을 초래할 수 있으므로 원형배치방법 등을 활용함이 효과적일 수 있다고 판단된다.

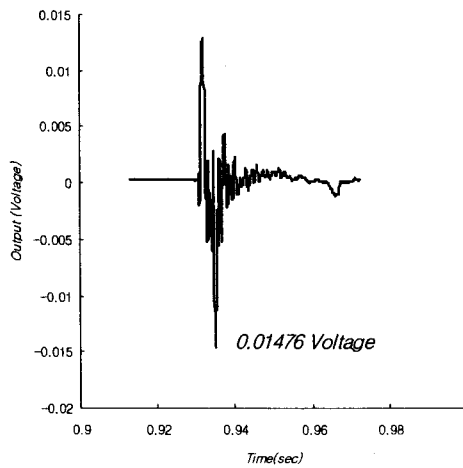


Fig. 6 Waveform of vibration
at 1m from blast hole

이효, 원연호, 김진수, 주영욱

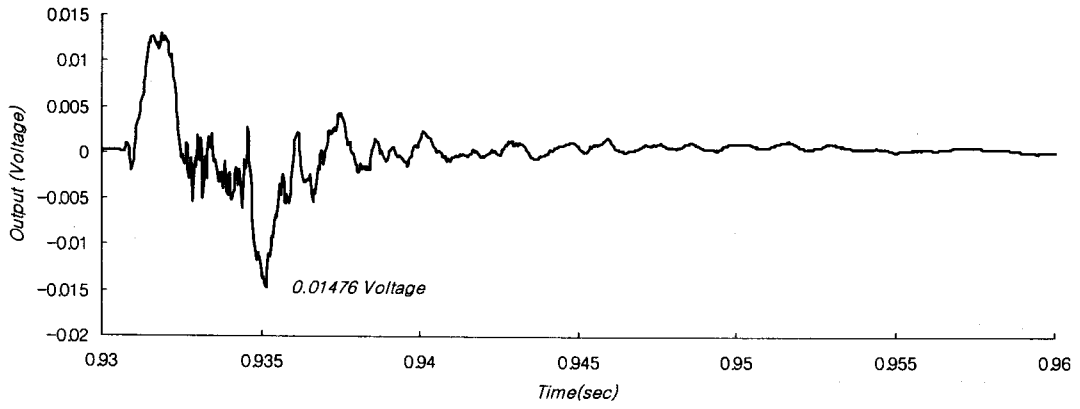


Fig. 8 Waveform of vibration at 1m from blast hole

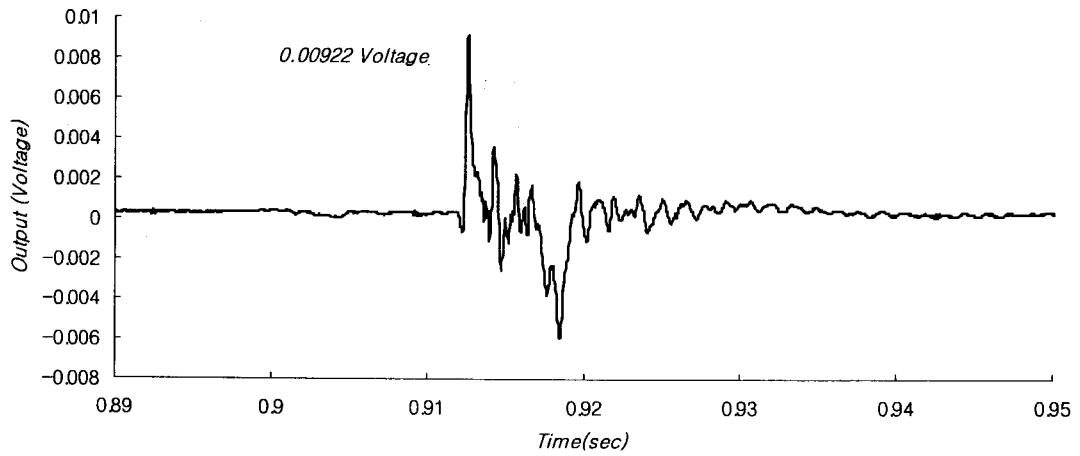


Fig. 9 Waveform of vibration at 2m from blast hole

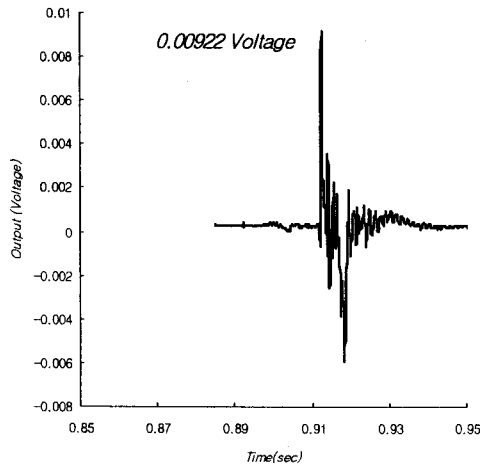


Fig. 7 Waveform of vibration
at 2m from blast hole

5. 결론

암반손상의 평가를 위한 손상권 예측방법에는 여러 가지가 있으나, 그 중에서 대부분이 발파진동속도에 근거하고 있으며, 평가를 위한 진동의 예측은 기존에는 원거리 진동특성을 이용하여 근거리 진동을 예측하는 방법으로 그 손상의 정도를 평가하였으나, 최근의 추세는 계측기의 발달로 수m 이내의 진동특성의 계측이 가능하게 되었다.

본 연구에서는 실제 발파공 근접진동(near field vibration) 계측을 실시하고 그 결과를 분석하여 추후 지속적인 근거리 진동측정 방법 및 평가방법에 대한 기초자료를 제공하고자 하였으며, 무엇보다도 어떻게 계측할 것인가 하는 계측방법 및 그 계측결과의 분석방법에 대해 문제점 파악 및 향후 보완점에 대해 비중을 두어 수행하였다.

금번의 실험결과로써 계측결과는 Table 5과 같지만, 계측결과의 신뢰성에 대해서는 재고할 필요성이 있다고 판단된다.

왜냐하면, 앞 절에서 언급한 여러 가지 계측시 발생하는 문제점을 충분히 보완을 실시한 후 보다 정확한 Data 수집이 필요하다고 판단되기 때문이다.

금번의 실험의 결과를 토대로 추후 지속적인 연구가 이루어지길 기대한다.

이효, 원연호, 김진수, 주영욱

참고문헌

1. R.L.Yang et., Rock fragmentation by blasting A.A.BALKEMA, pp137-144, 1993
2. Ingvar Bordanoff, Rock fragmentation by blasting A.A.BALKEMA, pp177-185, 1996
3. F.Ouchterliny,S.Nie,U.Nyberg & J.Deng, Rock fragmentation by blasting A.A.BALKEMA, pp167-176, 1996
4. 이희현, 채원규, 남순성 지진과 해석스펙트럼입문 도서출판 골드, pp12-15, 1996
5. 이희현, 채원규, 남순성 지진과 해석스펙트럼 입문 도서출판 골드, pp61-73, 1996
6. 김광식, 김찬목, 오재응, 안찬우 기계진동,소음공학 (주)교학사, pp232-238, 1994