

발파에 의한 근거리에서의 실제 측정치와 예측식에 의한 결과 비교 연구

김도형¹⁾ · 강추원²⁾ · 고진석²⁾ · 장호민¹⁾ · 류복현¹⁾

1. 서론

발파공과 인접한 지역에서 진동을 예측하는 방법은 Holmberg and Persson(1979)의 모델이 주로 사용되고 있으며, 발파공으로부터 정확한 거리에 의한 구분은 하지 않았고, 대체적으로 원거리 영역(far region)과 근거리 영역(near region)으로 구분하여 해석하였다.

이러한 구분을 시도하게 된 동기는 원거리 지표 진동이 주로 대상 구조물에 대한 피해영향의 한계를 규명하고자 하는데 그 목적이 있다면, 근거리 지중진동은 암반의 손상영역의 평가를 위해 주로 수행되어 왔다.

종래의 발파진동 분석은 주로 대상 지장물에 대한 피해한계를 정립시키고자 하는 관점에서 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.

Yang et al.(1993)은 발파공에서 15 m 이내는 근거리 진동(near field vibration), 15 m 이상은 원거리 진동(far field vibration)으로 구분하여 근거리 진동특성을 연구하였다. Bogdanoff(1996)는 터널의 스무스 발파(smooth blasting)에서 외곽공 및 전열공의 진동을 계측하였는데 그 결과 발파공으로부터의 이격거리 0.3 ~ 2.0 m 에서 0.6 ~ 3.9 m/s의 진동속도를 계측하였다. Rustan(1985)은 발파공으로부터의 이격거리 2 m 에서 0.3 ~ 0.9 m/s의 진동속도가 계측된 것을 보고하고 있다. 또한, Nie and Deng(1996)은 발파공으로부터의 이격거리 8 ~ 32 m 의 범위에서 약 0.1 ~ 0.8 m/s의 진동계측을 실시한 것을 보고하고 있다.

폭약이 폭발할 때에 기폭시 부터 최고 압력시까지 도달되는 시간은 화약의 종류마다 다르며 도달시간이 짧을수록 진동치와 주파수가 커진다고 한다. 따라서 폭속이 큰 폭약은 그 압력의 최고치에 도달하는 시간도 짧으므로 진동 값과 주파수도 커진다. 반대로 폭속이 낮은 폭약은 진동치와 주파수도 적어지게 된다.

본 연구에서는 ANFO, 에멀전 폭약(emulsion explosive), 다이너마이트(dynamite) 폭약을 이용하여 근거리 지중진동을 계측을 실시하였으며, 이 때 지중에 사용된 센서는 미국 PCB사의 Ltd센서를 사용하였다.

본 연구에서는 근거리에서 시험발파를 통한 실제 측정치를 얻고 이를 Holmberg and Persson 모델의 예측식을 통한 예측치와 비교하고자 하였다.

1) 조선대학교 자원공학과

2) 조선대학교 자원공학과 교수

2. 종래의 근거리 지중진동에 관한 연구

발파공과 인접한 경우의 근거리 지중진동에 대한 연구는 발파공으로부터의 이격 거리가 수 미터에서 수십 미터 이내에 해당되는 범위의 진동치가 주로 연구 대상이 된다는 점과 주로 실체파에 의해 진동이 전파된다는 점에서 원거리 진동과는 차이가 있다.

최근에는 계측기의 발달로 발파공으로부터 수 m 이내의 진동계측이 가능하게 되었으며, Yang et al.(1993)은 발파공으로부터 2 ~ 15 m 이내의 근거리 지중진동의 특성을 연구하였으며, 진동 가속도 성분에 대한 주파수 분석 결과 주주파수는 5000 ~ 7000 Hz인 것으로 보고되었다.

Bogdanoff(1996)는 터널의 스무스발파(smooth blasting)를 위한 외곽공 및 전열공의 진동을 계측하였는데 측정결과 0.75 m 의 거리에서 계측한 결과 최대 주주파수는 약 2000 ~ 5000 Hz의 범위로 분포하였다. Rustan(1985)은 2 m 거리에서 0.3 ~ 0.9 m/s의 진동속도가 계측된 것을 보고하고 있다. Table 2.1은 여러 학자들에 의해 시행되었던 근거리 측정결과를 나열하였다.

Table 2.1 Near field vibration monitored by previous researchers

Researchers	Condition of blasting & monitoring			Characteristics of vibration			Damage zone (m)	Remark
	Explosives	Linear charge density (kg/m)	Distance (m)	Acceleration (m/s ²)	PPV (m/s)	Frequency (Hz)		
Yang et al. (1993)	Magnafrac 100	-	2~15	4887 ~93800	0.36~6.2	5000~7000	-	Bench blasting
Rustan et al. (1985)	Pipe charge	0.18	2	-	0.3~0.9	-	0.4 ~ 0.5	The lowest measured value of vibration
	Detonation cord	0.14						
	ANFO	0.26						
Bogdanoff (1996)	Detonation cord	0.1	0.25, 0.65	-	2.5, 1.6	< 2000	-	Tunnel Smooth blasting
	22mm Gurit	0.3	1.0, 1.4		1.1, 0.6	< 2000		
	18mm Gurit	0.18	1.4		1.1~1.2	2000~5000		
	ANFO	1.45	<2		1.2~3.9	-		
Nie and Deng (1996)	Emulan 7500 & ANFO	-	8~32	-	0.1~0.8	-	-	Weight: diameter Bench blasting

3. 실험 방법 및 결과

3.1 근거리 지중진동의 계측 방법

본 실험은 근거리 지중진동의 계측을 위해 시험발파를 3회 실시하였다. 시험발파는 단일 공으로 발파하였으며 사용된 화약류는 ANFO, 다이너마이트, 에멀전 폭약 사용하였다.

Table 3.1은 각각의 시험발파에 사용된 폭약의 특성을 나타냈다.

센서의 설치위치는 지중진동의 기본적인 파형이 압축파(P)인 점을 감안하여 순수한 압축 파만의 영향을 고려하고자 하며 발파공에서 1 m 이격하여 설치하였다. 이는 대상암의 지질 학적인 변수를 최소화하기 위함이다.

Table 3.1 Properties of explosives

Explosive	VOD (m/s)	Density (g/cc)	Gas volume (l/kg)	Energy of explosion (kcal/kg)
ANFO	3300	0.75 ~ 0.85	970	1100
Dynamite	6100	1.3 ~ 1.5	880	1152
Emulsion	5700	1.1 ~ 1.2	826	880

시험발파에 앞서 폭약사용에 따라 고려할 사항이 있다. 3종류의 폭약 중 ANFO는 약한 기폭력으로 인해 전폭약포가 필요하다. 이러한 이유로 전폭약포로서 에멀전 폭약을 이용하여 발파를 실시하게 되는데 실제 측정 시에는 이들의 영향을 고려하여 실시하여야한다. 따라서 전폭약포로 에멀전 폭약을 사용시에는 에멀전 폭약의 장약장을 최대한 줄여야하며 ANFO의 장약장을 높이는 것이 중요하다. 이점을 고려하여 ANFO는 4.5 m 천공장을 사용하였다.

각 시험발파의 제원은 Table 3.2에 수록하였으며 Figure 3.1은 천공위치 및 센서의 설치 위치를 보여주고 있다.

Table 3.2 Pattern of test blasting

Blast No.	Drilling pattern			Charge pattern				
	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	50	0.8/1.0	0.38	1.86
				+				
				ANFO	-	8.0	2.26	
2	2.7	76	1.0	Dynamite	50	1.0/1.0	0.40	2.30
3	2.7	76	0.9	Emulsion	50	0.8/1.0	0.38	2.32

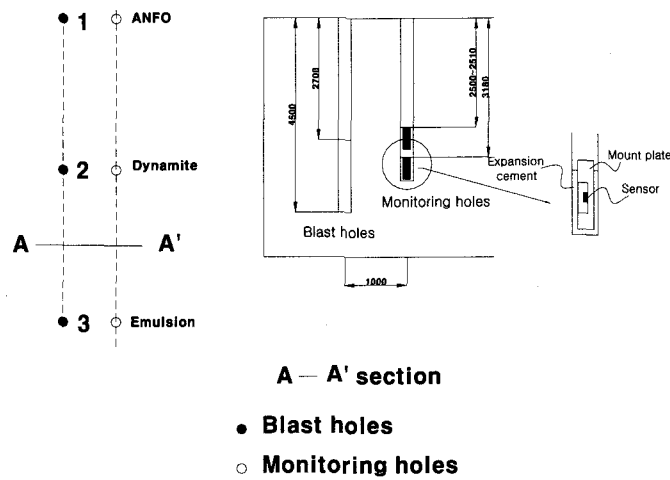


Figure 3.1 Experimental design for monitoring vibration.

3.2 계측 센서의 선정

발파공이 근거리 진동은 원거리 진동보다 수십 ~ 수백배 크고 주파수 영역 또한 높다. 따라서 이 범위를 충족시키기 위해 원거리 진동 측정시의 계측기와는 특성이 다른 장비를 사용해야 한다.

본 실험에서 사용된 센서는 측정 가능한 최대 주파수가 16 kHz, 진동센서의 샘플링 간격 $\Delta T = 0.00003125s$, 샘플링속도는 32 ksp/s 이상의 장비가 필요하다. 따라서 이러한 고주파 영역의 진동 측정 장비는 가속도형 센서로 측정이 이루어졌고 원거리 진동의 센서보다 크기가 작아진다.

Table 3.3에는 본 연구에 사용된 가속도형 계측센서와 속도형 계측센서의 특성을 비교하였다. 본 실험에서 사용된 센서는 Figure 3.2와 같다.

Table 3.3 Comparison of accelerometer with velocity sensor

Type of sensor	Application range	Maximum range		Sampling rate	Unit of output	Example
		Vibration	Frequency			
Accelerometer	Near field vibration	50000 g (500 km/s ²)	12 ~ 20 kHz	25 ~ 40 ksp/s	mmV/g V/g	PCB's sensor* Bruel and Kjar
Velocity	Far field vibration	240 mm/s	512 Hz	1024 sp/s	mm/s cm/s	Blastmate series geophone

* Used in this study

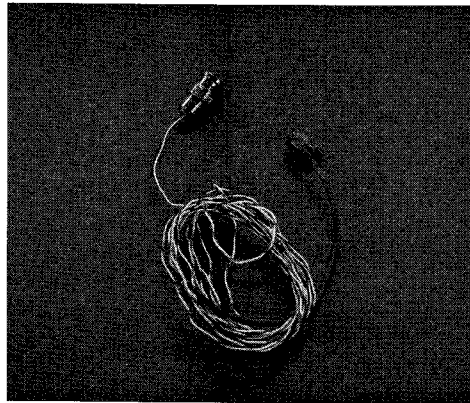
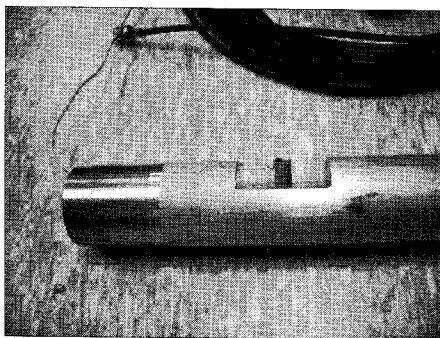
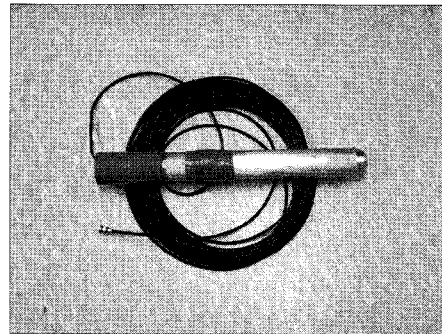


Figure 3.2 PCB's sensor.

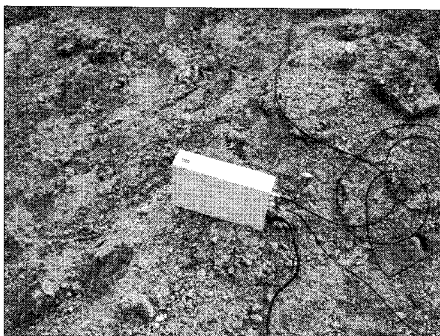


(a) View of Al-foot combined with sensor

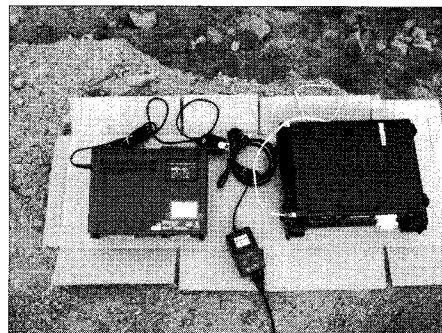


(b) View of Conical Al-foot combined with PVC pipe

Figure 3.3 Al-foot.

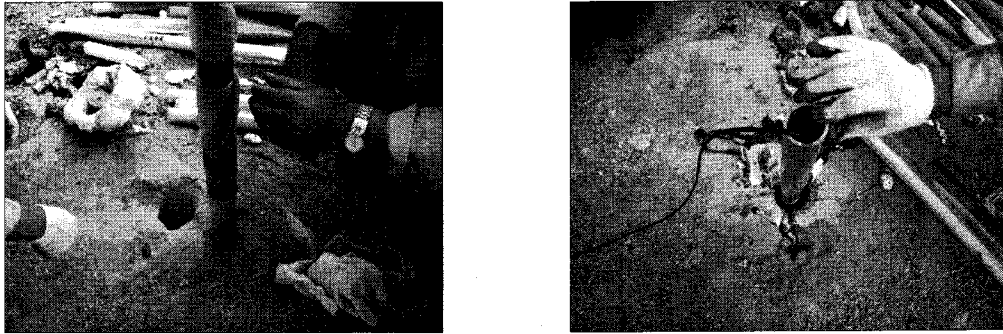


(a) Amplifier



(b) Signal conditioner and recording system

Figure 3.4 View of monitoring system for near field vibration.



(a) View before inserting

(b) View after inserting

Figure 3.5 Process of inserting Al-foot's sensor into the bore hole.

센서와 암반을 일체화시켜야 하는데 이때 사용된 매질의 임피던스의 조율이 가장 중요하다. Bogdanoff(1996) 와 Yang et al.(1993)은 센서가 부착되는 고정판 부분의 재질을 알루미늄을 선택하였고 Nie and Deng(1996)은 이 부분에 대한 언급이 없이 계측공과 PVC 파이프 사이의 공간을 그라우팅 한 것으로 나타내었다. 본 실험은 센서와 암반을 일체화시키기 위해 팽창성 시멘트(expansion cement)를 사용하여 그라우팅을 실시하였다.

센서 설치를 위한 고정판은 알루미늄 합금을 사용하여 직경 50 mm, 높이 500mm의 크기로 제작하였다.

Figure 3.3은 근거리 지중진동 측정을 위해 측공에 삽입된 알루미늄 봉을 보여주고 있다. 이들의 고정판에 본 연구에서 사용된 센서를 부착하기 위하여 직경 3 mm의 센서부착구멍을 만들고 센서를 나사형태로 고정시켰다. Figure 3.4는 진동치를 측정하기 위한 측정기기를 보여 주고 있다.

근거리 지중진동의 측정을 위한 알루미늄 봉에는 PVC 파이프가 나사형태로 고정이 가능하도록 외부에 나사선을 제작하였으며 이들 센서가 부착된 고정판을 계측공에 고착시켰다. Figure 3.5는 센서의 삽입 장면을 보여주고 있다.

3.3 계측 결과

본 연구에서 시험발파에 따른 각 폭약의 측정 결과치는 ANFO는 진동속도가 4.28 m/s , 진동가속도가 38064 m/s^2 , 다이너마이트는 진동속도가 1.4 m/s , 진동가속도가 38064 m/s^2 , 에멀전 폭약은 진동속도가 1.27 m/s , 진동가속도가 34257 m/s^2 로 계측되었다. 또한 주파수는 대략 4000 ~ 5000 Hz 의 범위로 분포하였다.

위에 나타난 결과치는 Table 3.4에 수록하였으며, 각 결과치의 따른 파형과 주파수는 Figure 3.6 ~ 3.8 에 나타내었다.

Table 3.4 Results of measured vibration

Test No.	Explosives	Linear charge density (kg/m)	Weight (kg/hole)	Monitoring distance (m)	Acceleration (m/s ²)	PPV (m/s)	Frequency (Hz)	Remark
1	ANFO	3.31	8.8	1.0	58619	4.28	4000 ~ 5000	Primer: Emulsion 0.8kg
2	Dynamite	2.5	1.0	1.0	38064	1.41	4000 ~ 5000	
3	Emulsion	2.1	0.8	1.0	34257	1.27	4000 ~ 5000	

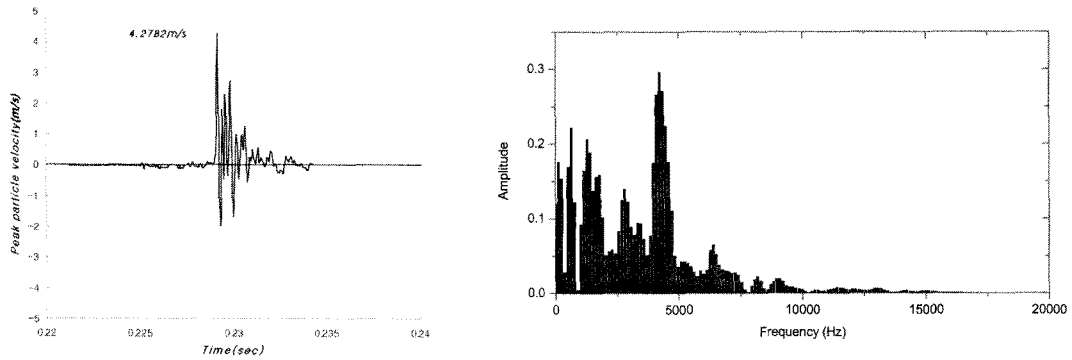


Figure 3.6 Waveform and FFT analysis of ppv by ANFO.

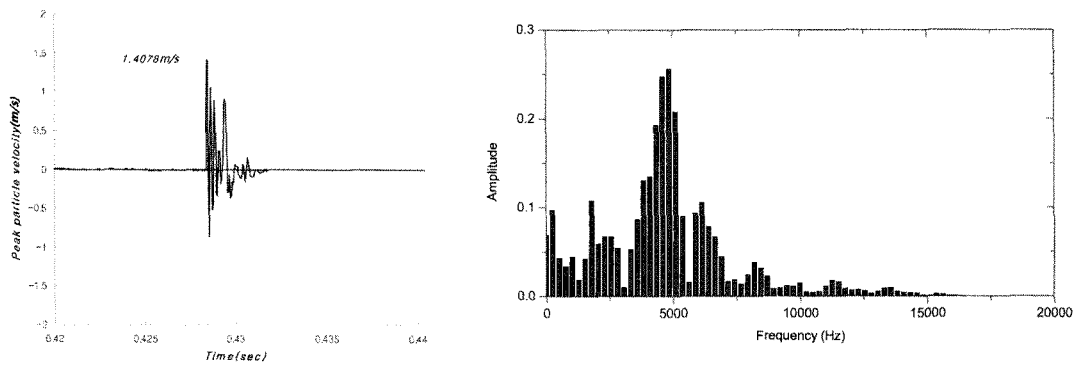


Figure 3.7 Waveform and FFT analysis of ppv by dynamite.

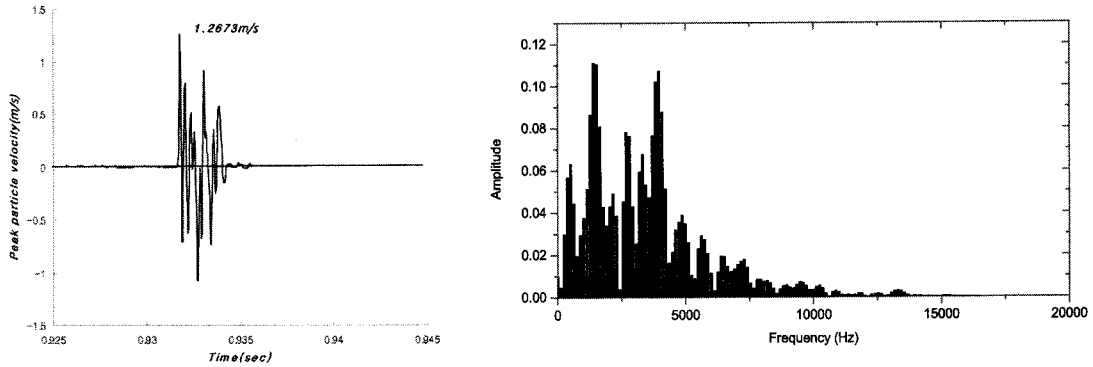


Figure 3.8 Waveform and FFT analysis of ppv by emulsion explosive.

4. 현장계측과 예측식에 의한 결과 비교

4.1 근거리 진동의 예측 방법

Holmberg and Persson(1979)은 발파 진동의 해석영역의 관점에서 근거리(near region)진동과 원거리(far region)진동으로 용어상의 구분은 이루어졌다. 그러나 발파공으로부터 어느 범위까지를 구분하고 있는지에 대한 정량적인 자료는 제시되지 않았다.

본 연구에서는 근거리 예측 진동치와 앞서 수행된 현장계측한 근거리 진동과 비교하기 위하여 Holmberg and Persson의 모델을 이용하였다.

Figure 4.1을 이용하여 다음과 같은 식 (4.2)가 되고 이를 이용해 발파공 근거리에서 진동 속도의 예측할 수 있다.

$$V_{far} = K \frac{W^\alpha}{R^\beta} \quad (4.1)$$

$$V_{near} = K \left(\frac{l}{r_0} \right)^\alpha \left[\arctan \left(\frac{H + x_s - x_0}{r_0} \right) + \arctan \frac{(x_0 - x_s)}{r_0} \right]^\alpha \quad (4.2)$$

Figure 4.1에서 보여주는 바와 같이 암반에 천공된 장약공의 장약장이 H이고, 선형 장약 집중도가 $l(kg/m)$ 인 폭약은 장전했다고 가정하면 장약축으로부터 임의의 거리 r_0 에서 장약의 폭굉으로 발생한 발파진동을 예측할 수 있다.

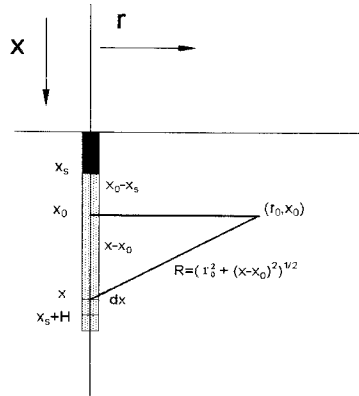


Figure 4.1 Calculation of near field vibration (Holmberg and Persson, 1979).

4.2 원거리 계측을 통한 K , α , β 의 결정

Holmberg and Persson(1979)의 모델은 발파공과 인접하여 발생하는 근거리 지중진동의 크기를 예측하는데 있어서, 원거리 지표 진동측정결과를 이용하여 식 (4.1)에서 상수값을 결정한 후 식 (4.2)에 의하여 근거리 지중진동의 크기를 예측해야하는데 식 (4.1)을 사용하기 위해서는 식 (4.2)에서 $\beta = 2\alpha$ 의 조건을 만족해야한다. 그러나 실제 현장에서 측정된 데이터를 분석한 결과는 $\beta = 2\alpha$ 를 만족하지 못하는 경우가 대부분이다.

Holmberg and Persson의 모델에서 K, α, β 값은 대상암반의 회귀분석을 통한 값이 아닌 $\beta = 2\alpha$ 를 만족하는 상수인 탄성적 특성과 발파구역의 다양한 특성 및 구조가 기인하는 대체적인 α 값 0.5 ~ 1.0 (0.7), β 는 2내외, $K = 0.7$ 의 값을 나타내고 있다.

본 연구에서는 근거리 지중 진동치를 예측하기 위해 원거리 지표진동을 측정하였으며 이를 이용하여 회귀분석을 실시하였다.

회귀분석은 자승근 환산거리를 이용하였으며 결과는 $K = 0.37$, α 값은 0.948, β 는 1.896으로 나왔다. 이는 Table 4.1에 수록하였으며 Figure 4.2에는 회귀분석그래프를 나타내었다.

Table 4.1 Results of simple regression analysis

Number of Data	K	$\alpha = \frac{n}{2}$	$\beta = n$	Coefficient of determination
20	372.58	0.948	1.896	0.96
Square Root SD	$V_{50\%} = 372.58 \left(\frac{R}{\sqrt{W}} \right)^{-1.89}$			

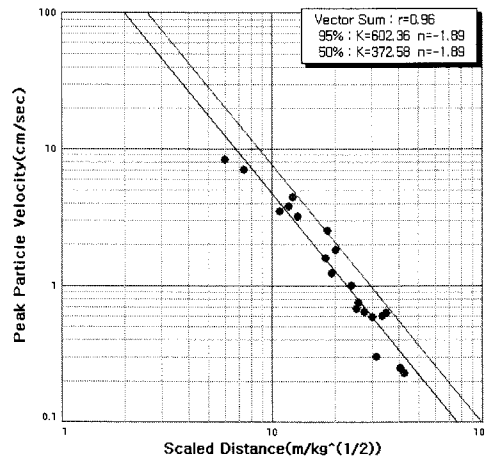


Figure 4.2 Results of simple regression analysis.

4.3 예측치와 실측치의 결과 비교

식 (4.2)를 이용하여 예측된 진동치와 현장계측에 따른 결과는 Table 4.2에 수록하였다.

Table 4.2 Comparison of results of expected near field vibration and measured near field vibration

Explosives	Distance (m)	Linear charge density (kg/m)	Results of expected near field vibration	Results of measured near field vibration		
			PPV (m/s)	Acceleration (m/s^2)	PPV (m/s)	Frequency (Hz)
ANFO	1	3.31	2.06	58619	4.28	4000 ~ 5000
Dynamite	1	2.5	0.37	38064	1.41	4000 ~ 5000
Emulsion	1	2.1	0.30	34257	1.27	4000 ~ 5000

Table 4.2에 Holmberg and Persson(1979) 모델에 의한 근거리 예측진동치의 결과 ANFO의 경우는 2.06 m/s, 다이너마이트는 0.37 m/s, 에멀전 폭약의 경우는 0.30 m/s로 실측된 진동치와 많은 차이를 보이고 있다.

본 연구에서 시험결과를 통한 3종류의 폭약으로부터 얻은 각각의 근거리 진동 예측치는 Figure 4.3 ~ 4.5 에 나타내었다.

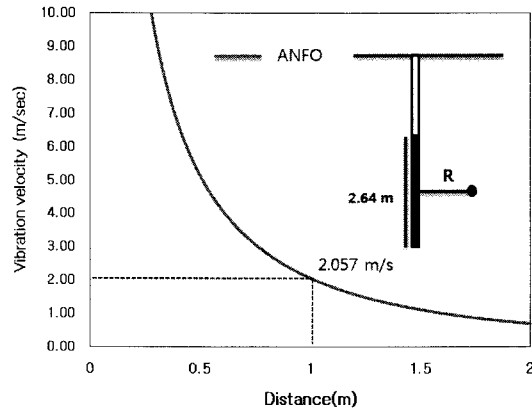


Figure 4.3 Expected near field vibration by ANFO.

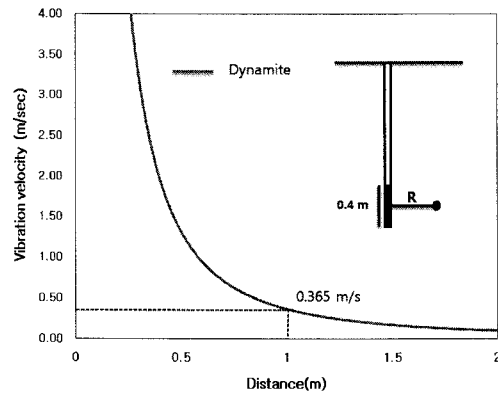


Figure 4.4 Expected near field vibration by using dynamite.

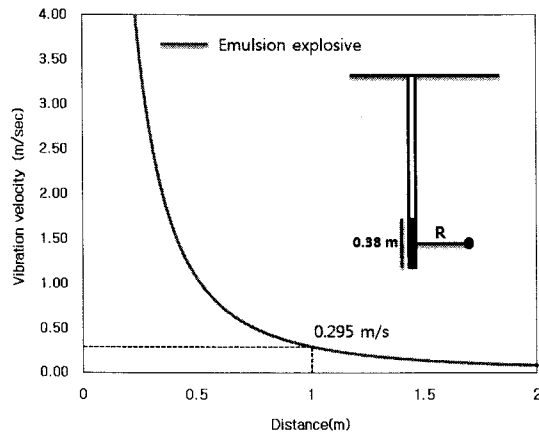


Figure 4.5 Expected near field vibration by emulsion explosive.

5. 결론

본 연구는 3종류의 화약을 이용해 단일공 발파 3회를 실시하였다. 시험발파를 통해 실측된 근거리 진동을 얻고 이를 Holmberg and Persson(1979)의 모델을 이용하여 발파공으로부터 1 m거리의 예측진동치를 구하여 비교한 연구결과는 다음과 같다.

1. 발파 시 근거리 진동 측정결과는 ANFO의 경우 진동속도가 4.28 m/s , 진동가속도가 58619 m/s^2 , 다이너마이트의 경우는 진동속도가 1.41 m/s , 진동가속도가 38064 m/s^2 , 에멀전 폭약은 진동속도가 1.27 m/s , 진동가속도가 34257 m/s^2 로 계측되었다. 각각의 주파수 특성은 대체적으로 4000 ~ 5000 Hz의 범위가 지배적인 것으로 검토되었다.
2. 본 연구에서 근거리 지중 진동치를 예측하기 위해 원거리 지표진동을 측정하였으며 예측식에 사용될 K, α, β 값은 이를 이용하여 회귀분석을 실시하였다. 회귀분석은 자승근 환산거리를 이용하였으며 결과는 $K=372.58$, α 값은 0.948, β 는 1.896이다.
3. Holmberg and Persson의 모델을 이용한 1 m 거리에서의 예측 진동치는 ANFO의 경우 진동속도가 2.06 m/s , 다이너마이트의 경우 0.37 m/s 로 예측되었고, 에멀전 폭약은 0.30 m/s 로 예측되었다. 예측치를 구하기 위한 조건은 시험발파와 동일하게 주어졌으며, 본 연구에서 시험발파를 통해 얻은 실제 측정치와 예측치가 다소 많은 차이를 보였다. 이것은 본 시험발파에서는 근거리 지중진동을 측정하였고 Holmberg and Persson의 모델은 원거리 지표진동에 의한 예측진동치를 예측하므로 차이가 있다고 판단된다.
또 다른 원인으로 발파공에서부터 근거리 진동은 작은 변수에도 큰 영향을 받으며 이러한 변수가 발생하는 원인으로서는 장약과정에서 기계를 통한 정밀한 작업이 아닌 인력을 이용한 수작업으로 이루어지기 때문에 오차가 생길 수 있으며, 근거리에서는 암반의 미세균열과 같은 작은 변수에도 진동이 다르게 나타날 수 있기 때문이라고 사료된다.
4. 전술한 바와 같이 정확한 예측을 위해서는 새로운 예측기법의 개발이 필요한 실정이다. 따라서 이를 위한 이론적 확립과 적절한 방법의 개발을 위해 지속적인 근거리 진동계측 실험 및 분석에 대해 많은 연구가 필요하다고 사료된다.

참고문헌

1. 원연호, 이효 외, 발파공 주변의 인접거리 진동계측 사례연구, 대한화약발파공학회, 제 24권 제2호, pp. 83~91.
2. 이연수 외, 2007, 구조물에서 발파진동속도와 가속도레벨과의 상관관계, 대한환경공학회, The 2007 Environmental Societies Joint Conference, pp.1011~1016.
3. 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.
4. Holmberg R. et al., 1993, Rock blasting and explosives engineering, CRC press, pp.244~245.
5. 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.
6. Rustan., Naarttjärve. and Ludwig., 1985, Controlled blasting in hard intense jointed rock in tunnels, CIM Bulletin, pp.63~68.
7. S.Nie et al., 1996, Monitoring of large open cut rounds by VOD, PPV and pressure measurements, Proc. 5th Int. Symp. on Rock Fragmentation by Blasting, pp.167~176.
8. Yang et al., 1993, Blast damage study by measurement of blast vibration and damage in the ares adjacent to blast hole, Proc. 4th Int. Symp. on Rock Fragmentation by Blasting, pp.137~144.