

## 시험발파 계측자료 분석을 통한 암석 발파진동 특성 분석

# Analysis on the Characteristics of Rock Blasting-induced Vibration Based on the Analysis of Test Blasting Measurement Data

손 무 락<sup>1)</sup> · 유 재 하<sup>2)</sup> · 안 성 수<sup>2)</sup> · 황 영 철<sup>†</sup> · 박 두 희<sup>3)</sup> · 문 두 형<sup>4)</sup>

Moorak Son · Jaeha Ryu · Sungsoo Ahn · Youngcheol Hwang · Duhee Park · Duhyeong Moon

Received: June 15<sup>th</sup>, 2015; Revised: June 29<sup>th</sup>, 2015; Accepted: August 3<sup>rd</sup>, 2015

**ABSTRACT** : This study examined blast testing measurement data which had been obtained from 97 field sites in Korea to investigate the comprehensive characteristics of rock blasting-induced vibration focusing on the effect of excavation types (tunnel, bench) and rock types. The measurement data was from the testing sites mostly in Kangwon province and Kyung-sang province and rock types were granite, gneiss, limestone, sand stone, and shale in the order of number of data. The study indicated that the blasting-induced vibration velocity was affected by the excavation types (tunnel, bench) and bench blasting induced higher velocity than tunnel blasting. In addition, the vibration velocity was also highly affected by the rock types and therefore, it can be concluded that rock types should be considered in the future to estimate a blasting-induced vibration velocity. Furthermore, the pre-existing criteria was compared with the results of this study and the comparison indicated that there was a discernable difference except for tunnel blasting results based on the square root scaling and therefore, further studies and interests, which include the effects of rock strength, joint characteristics, geological formation, excavation type, power type, measurement equipment and method, might be necessarily in relation to the estimation of blasting-induced vibration velocity in rock mass.

**Keywords** : Blast testing, Blasting-induced vibration, Field measurement, Rock type, Tunnel blasting, Bench blasting

**요 지** : 본 논문에서는 암석발파 유발 진동에 대한 포괄적인 추세특성을 파악하기 위하여 국내 97개의 현장에서 계측된 시험발파 진동에 관한 자료를 이용하여 굴착종류(터널, 벤치굴착) 및 암석종류별로 발파진동의 특성을 조사 및 검토하였다. 계측된 자료는 주로 강원도 및 경상도 지역의 시험발파 현장으로부터 획득하였으며, 계측현장 자료의 암석종류는 화강암이 제일 많았으며 그다음으로 편마암, 석회암, 사암, 세일 순으로 나타났다. 본 연구를 통한 분석 결과, 발파진동 속도는 굴착종류(터널, 벤치)에 따라 영향을 받는 것으로 나타났으며, 터널발파에 비하여 벤치발파에 의한 진동속도가 더 크게 발생하는 것으로 나타났다. 또한 발파진동은 암석 종류에 따라 크게 영향을 받는 것으로 나타나 향후 암석종류를 포함한 발파진동 추정식 관리가 필요할 것으로 나타났다. 이와 더불어 본 연구를 통해 얻어진 결과와 기존의 국내 발파진동 추정식에 의한 결과들과 상호 비교하였으며, 비교결과 터널발파에서 자승 근식을 이용한 결과를 제외하곤 큰 차이가 나타나 향후 암반에서의 발파진동 추정과 관련하여 암석의 강도 및 절리특성, 지층분포, 굴착종류, 사용화약, 계측장비 및 방법 등의 영향을 종합적으로 반영한 더욱더 많은 연구 및 관심이 필요할 것으로 판단된다.

**주요어** : 시험발파, 발파진동, 현장계측, 암석종류, 터널발파, 벤치발파

## 1. 서 론

도로 및 철도, 지하철, 아파트 건설 등을 위한 다양한 굴착공사가 국내 곳곳에서 행해지고 있다. 국내 지층은 일반적으로 얇은 깊이에서 암반층이 출현하게 되어 많은 굴착공사가 화약을 이용하는 발파굴착이 이루어지고 있다. 하지만 발파로 인한 굴착은 발파진동을 유발하여 주변 시설물에 균열 등의 문제점을 종종 발생시키고 있다. 이와 같은 이유로 발파굴착으로 인해 발생하는 진동의 크기를 추정하여 주변

시설물에 발생하는 피해를 최소화하고자 하는 다양한 연구가 진행되어 왔다. 발파진동의 크기를 추정하기 위해서는 발파진동에 영향을 미치는 요소들을 파악하여야 하는데 일반적으로 사용되는 화약의 종류 및 장약량, 거리 및 매질의 전파속도, 장약 및 기폭방법 등이 발파진동에 영향을 미치는 것으로 고려된다. 이에 따라 발파로 인한 진동속도의 추정은 일반적으로 Eq. (1)과 같이 나타내고 있다.

$$V = K \left( \frac{D}{W^b} \right)^n \quad (1)$$

1) Department of Civil Engineering, Daegu University

2) Expressway Design Evaluation Division, Korea Expressway Corporation

† Department of Civil Engineering, Sangji University (Corresponding Author : ychwang@sangji.ac.kr)

3) Department of Civil and Environmental Engineering, Hanyang University

4) Yongma Engineering

여기서  $V$ =발파진동 속도(cm/sec),  $W$ =지발당 장약량(kg/delay),  $D$ =발파 폭원과 계측점 사이의 거리(m),  $K$ =발파진동 상수,  $b$ =장약지수,  $n$ =감쇠지수를 나타낸다. Eq. (1)에서  $K$ 와  $n$ 은 매질의 진동전달 특성을 반영하는 계수로서 입지상수라 하며,  $b$ 는 장약과 관련된 상수로서  $b=1/2$ 일 때를 자승근 환산,  $b=1/3$ 일 때를 삼승근 환산이라 한다. 발파진동 속도의 예측은 여러 학자들에 의하여 많은 방식이 제안되어 왔으며, 현재로써는 자승근 환산식(Square root scaling), 삼승근 환산식(Cube root scaling) 그리고 입지특성 환산식(Site specific scaling)의 형태로 구분할 수 있다. 이 중 자승근 환산식과 삼승근 환산식이 널리 사용되고 있으며, 입지특성 환산식은 환산거리가 매우 짧은 근접발파의 경우 적합한 것으로 보고되고 있다. Dowding(1985)은 6m~31m 거리에서는 자승근 환산식과 삼승근 환산식 사이에는 큰 차이가 없으며 31m보다 더 먼 거리에서는 자승근 환산식이 보다 보수적이며 6m보다 더 짧은 거리에서는 삼승근 환산식이 보다 보수적이라고 보고한 바 있다. 환산거리에 따른 발파진동 예측식에 대한 신뢰도는 연구자마다 견해 차이를 나타내기는 하나, 전반적으로 삼승근 환산거리를 사용한 경우가 조금 더 신뢰성이 있는 것으로 평가되고 있다. 서울 지하철공사에서 화강암 및 편마암 지역의 굴착작업에 따른 발파진동 측정자료를 종합한 결과에서도 삼승근 환산을 이용한 경우가 조금 더 높은 상관관계를 갖는 것으로 나타났다.

발파진동 추정에 관해서는 국내·외를 비롯하여 다양한 연구가 수행되었다. 국외연구로는 Langefors et al.(1958), Duvall & Fogelson(1962), Duvall & Devine(1968), Ambrasyes & Hendron(1968), Nicholls et al.(1971), Roy(1993) 및 Adhikaria et al.(2004) 등이 현장계측을 통한 발파진동 추정에 관한 연구를 발표하였으며 최근에는 Singh(2004) 및 Khandelwal & Singh(2009) 등이 인공지능(Artificial Neural Network)을 이용한 발파진동 추정에 관한 연구를 수행하였다. 국내연구로는 Lee et al.(1984), Seoul Metropolitan Rapid Transit Corporation (1984), Yang & Ju(1990), Kim et al.(1991), Lim & Kim (1992), Kim et al.(1994) 및 Chun & Oh(1995) 등이 발파진동 추정에 관한 연구를 수행한 바 있다. 이와 같이 발파진동 추정에 관한 많은 연구가 진행되었지만 각 연구는 각각 측정된 곳의 지형, 지질 및 화약특성 등에 따라 서로 다른 다양한 진동추정 결과들을 제시하고 있다.

지반을 전파매체로 하는 진동의 경우에는 지반 및 지형 등의 다양하고 복잡한 조건에 따라 전파되는 진동의 크기가 달라지게 되므로, 관련 변수를 평가하고 그 적용상의 오류를 개선하는 등의 보안을 통하여 지속적으로 진동 추정치의 신뢰성을 높이는 것이 필요하다. 다시 말해서 각각의 현장에 있어서 현장계측에 의하지 않고는 발파에 의한 진동속도의

정확한 추정은 불가능하며, 다양한 조건하에서 많은 진동 추정식들이 기존 연구를 통하여 보고되었다 할지라도 그러한 식들은 주어진 조건하에서만 의미를 갖는다고 할 수 있다.

그러므로 주어진 환경에서 현장계측을 통하여 진동속도를 측정할 필요가 있으며, 계측된 정보가 없을 경우에는 최대한 현재의 환경과 유사한 환경에서 제공된 추정식을 사용하는 것이 바람직할 것이다.

앞서 언급한 바와 같이, 진동속도는 많은 요인에 의하여 영향을 받게 되므로 추정식이 충분한 신뢰도를 갖기 위해서는 가능한 한 많은 양의 실측 데이터를 근거로 제안되어야 한다. 현재까지 보고된 바로는 미광무국의 추정식이 일반적 조건에서 가장 많은 양의 실측 데이터를 근거로 제안되었으며, 국내에서 제안된 추정식들은 아직까지는 만족할 만한 신뢰도를 갖기에 부족한 면이 존재한다.

따라서 본 연구에서는 국내 총 97개 현장위치에서 계측된 시험발파 자료를 조사하여 분석함으로써 암석종류 및 굴착종류(터널발파, 벤치발파)에 따른 발파진동 특성을 제시함으로써 기존연구에 추가하여 발파진동 추정에 관한 더 많은 정보를 제공하고 이를 통해 발파굴착에 따른 진동추정이 보다 더 신뢰성 있게 이루어질 수 있도록 함에 그 목적이 있다.

## 2. 현장 측정자료 수집 및 분석

본 연구에서는 다양한 터널 및 노천발파 현장으로부터 수집된 시험발파 진동계측 자료를 이용하여, 암석종류 및 굴착종류(터널, 벤치)별로 구분하여 발파진동 추정식의 도출을 위한 분석을 수행하였다. 총 97개 현장(강원도 52%, 경상도 44%, 기타 4%)에서의 시험발파 자료를 이용하였으며, 암석종류로는 화강암이 제일 많았고 그다음으로 편마암, 석회암, 사암, 셰일 순으로 나타났다. 총 671개 위치에서 최대진동속도(P.P.V)를 측정하였으며 이로부터 발생된 총 1,778개의 계측자료를 이용하였다. 사용한 계측장비는 Blastmate(65%), PmT(eXAD8)(19%), VMS(6%), 기타(10%)로 나타났으며 발파에 사용된 화약의 종류는 에멀전(40%), 에멀전(뉴마이트)(25%), 에멀전(뉴에뮤라이트)(9%), 에멀전(뉴화이텍스)(9%), 에멀전 정밀폭약(KINEX)(14%), 기타(4%)로 나타났다.

### 2.1 암석종류에 따른 거리별 발파진동 속도

다음 표들은 각 현장에서 실측한 시험발파 자료를 암석종류별로 구분하여 나타낸 것이다. 암종 구분은 현장 지반조사를 통해 구분하였으며 거리별 발파진동 속도 분석을 위하여 자승근식과 삼승근식 각각을 적용하여 회귀분석에 이용하였다.

### 2.1.1 P.P.V 분류 결과(자승근)

시험발파가 시행된 발파원의 위치를 바탕으로 P.P.V를 측정하여 발파진동에 자승근식, 삼승근식, 암종별로 분류하여 회귀분석을 수행한 결과 Table 1 및 Table 2와 같은 결과를 얻었다. 회귀분석에 활용한 자료는 총 1,778개였으며 암종별로는 화강암은 551개, 편마암 342개, 석회암 216개, 셰일 82개, 변성암 114개, 사암 116개, 퇴적암 69개로 나타났으며 나머지 288개의 경우 암종별 구분이 되어 있지 않아 암종별 분석에는 사용하지 않았다.

전체적으로 결정계수( $R^2$ )가 0.62 정도로 나타났으며 셰일에서 결정계수가 상대적으로 높게 나타났고 화강암과 석회암에서 보통 정도로 나타났으며 사암에서는 결정계수가 상대적으로 낮게 나타났다.

### 2.1.2 P.P.V 분류 결과(삼승근)

삼승근식을 적용하여 자승근식과 마찬가지로 각 시험발파 자료에 대한 회귀분석을 수행하였으며, 회귀분석의 결과를 Table 2에 정리하여 나타내었다.

전체적으로 결정계수( $R^2$ )가 0.63 정도로 나타났으며 자승근식 회귀분석 결과와 마찬가지로 셰일에서 결정계수가 상대적으로 높게 나타났고 화강암과 석회암에서 보통 정도로 나타났으며 사암에서는 결정계수가 상대적으로 낮게 나타났다.

## 2.2 굴착종류(벤치, 터널)별 암종에 따른 거리별 발파 진동 속도

### 2.2.1 P.P.V 암종별 벤치, 터널 분류 결과(자승근)

현장계측 자료를 터널과 벤치로 분류할 경우 총 1,778개 중에서 255개는 터널, 1,052개는 벤치로 나타났다. 먼저 자승근식을 이용하여 벤치와 터널을 회귀분석한 결과는 Table 3과 같다.

전체적으로 벤치발파에서 결정계수가 약간 높게 나타났으나 암종에 따라서 결정계수가 각각 달리 나타났다. 셰일에서는 터널 및 벤치에 대한 결정계수가 가장 큰 차이를 나타냈으며 이는 터널에 대한 계측자료가 상대적으로 적은 것에 기인한 것이라 판단된다. 사암에서는 터널 및 벤치 모두 결정계수가 가장 낮게 나타났다.

Table 1. Results of regression analysis using square root scaling

Category		No. of data	Confidence	K	n	$R^2$	
Square root scaling	Total	1,778	50%	48	1.4	0.62	
			95%	190	1.4	0.62	
	Rock type	Granite	551	50%	71	1.47	0.66
				95%	265	1.47	0.66
		Gneiss	342	50%	43	1.4	0.53
				95%	188	1.4	0.53
		Lime stone	216	50%	87	1.5	0.66
				95%	285	1.5	0.66
	Shale	82	50%	45	1.35	0.86	
			95%	133	1.35	0.86	
	Sand stone	116	50%	29	1.25	0.42	
			95%	166	1.25	0.42	

Table 2. Results of regression analysis using cube root scaling

Category		No. of data	Confidence	K	n	$R^2$	
Cube root scaling	Total	1,778	50%	73	1.45	0.63	
			95%	285	1.45	0.63	
	Rock type	Granite	551	50%	93	1.47	0.64
				95%	362	1.47	0.64
		Gneiss	342	50%	145	1.66	0.55
				95%	621	1.66	0.55
		Lime stone	216	50%	136	1.59	0.74
				95%	380	1.59	0.74
	Shale	82	50%	66	1.42	0.85	
			95%	198	1.42	0.85	
	Sand stone	116	50%	94	1.48	0.50	
			95%	487	1.48	0.50	

Table 3. Results of regression analysis for different excavation type using square root scaling

Category		No. of data		Confidence	K	n	$R^2$	
Square root scaling	Excavation type	Tunnel	255		50%	17	1.22	0.59
					95%	61	1.22	0.59
		Bench	1,052		50%	63	1.43	0.62
					95%	250	1.43	0.62
	Rock type	Granite	Tunnel	114	50%	22	1.28	0.65
					95%	75	1.28	0.65
			Bench	437	50%	79	1.47	0.66
					95%	293	1.47	0.66
		Gneiss	Tunnel	59	50%	15	1.27	0.67
					95%	53	1.27	0.67
			Bench	283	50%	45.3	1.39	0.50
					95%	196	1.39	0.50
		Lime stone	Tunnel	31	50%	35	1.35	0.71
					95%	111	1.35	0.71
			Bench	185	50%	90	1.5	0.62
					95%	294	1.5	0.62
		Shale	Tunnel	9	50%	2	0.67	0.31
					95%	9	0.67	0.31
			Bench	73	50%	59	1.43	0.89
					95%	1,599	1.43	0.89
		Sand stone	Tunnel	42	50%	16	1.12	0.38
					95%	55	1.12	0.38
			Bench	74	50%	33	1.28	0.43
					95%	251	1.28	0.43

Table 4. Results of regression analysis for different excavation type using cube root scaling

Category		No. of data		Confidence	K	n	$R^2$	
Cube root scaling	Excavation type	Tunnel	255		50%	25	1.27	0.6
					95%	88	1.27	0.6
		Bench	1,052		50%	108	1.52	0.63
					95%	421	1.52	0.63
	Rock type	Granite	Tunnel	114	50%	21	1.24	0.61
					95%	77	1.24	0.61
			Bench	437	50%	118	1.5	0.66
					95%	442	1.5	0.66
		Gneiss	Tunnel	59	50%	40	1.46	0.75
					95%	120	1.46	0.75
			Bench	283	50%	163	1.66	0.49
					95%	715	1.66	0.49
		Lime stone	Tunnel	31	50%	54	1.42	0.76
					95%	156	1.42	0.76
			Bench	185	50%	148	1.6	0.72
					95%	413	1.6	0.72
		Shale	Tunnel	9	50%	5	0.82	0.41
					95%	18	0.82	0.41
			Bench	73	50%	85	1.49	0.88
					95%	240	1.49	0.88
		Sand stone	Tunnel	42	50%	38	1.28	0.43
					95%	128	1.28	0.43
			Bench	74	50%	117	1.52	0.51
					95%	757	1.52	0.51

### 2.2.2 P.P.V 벤치, 터널 분류 결과(삼승근)

삼승근식으로 벤치와 터널을 분류한 회귀분석 결과는 Table 4와 같다.

전체적으로 회귀분석의 결과가 자승근식에서와 유사한 경향을 나타냈다.

## 3. 기존 발파진동 추정식과의 비교

본 장에서는 국내 발파현장에서 널리 통용되고 있는 미광무국(USBM)식에 기본바탕을 둔 국토해양부 진동 추정식에 의한 거리별 발파진동 속도와 본 연구를 통한 발파진동 추정식에 의한 거리별 발파진동 속도를 비교하여 보았다.

본 연구를 통해 추정된 발파진동 추정식은 전체적으로 결정계수( $R^2$ )가 자승근식은 0.62, 삼승근식은 0.63으로 나타

나 자승근식과 삼승근식에 대한 차이는 크지 않은 것으로 나타났다.

암종별로 구분할 경우 암종에 따라 회귀분석자료의 결정계수가 차이가 있는 것으로 나타났으며, 세일이 가장 높고 사암이 가장 낮게 나타났다.

굴착종류별로 구분하여 측정된 자료를 회귀분석한 결과 터널발파와 벤치발파는 발파진동추정을 위한 K 값과 n 값이 차이가 있는 것으로 나타났다.

본 연구에서는 암종별 및 굴착종류별로 구분하여 추정한 발파진동 속도 추정식과 현재 사용되고 있는 국내 발파진동속도 추정식(건설교통부(Ministry of Construction and Transportation, 2003; 2006))에 의한 거리별 발파진동 속도를 비교하고자 하였으며 그 결과를 Table 5 및 Fig. 1~5에 나타내었다.

Fig. 1은 암석종류의 구분 없이 굴착종류를 터널발파와 벤치발파로 구분한 발파진동 추정식에 의한 결과와 기존 건

Table 5. Comparison between MCT and this study of the assessment of blasting-induced peak particle velocity

Criteria		Equation	
Ministry of Construction and Transportation (2003)		$V = 160 \left( \frac{D}{W^{1/2}} \right)^{-1.6}$	
Ministry of Construction and Transportation (2006)		$V = 200 \left( \frac{D}{W^{1/2}} \right)^{-1.6}$	
This study	Square root scaling	Total	$V = 190 \left( \frac{D}{W^{1/2}} \right)^{-1.4}$
		Granite	$V = 265 \left( \frac{D}{W^{1/2}} \right)^{-1.47}$
		Gneiss	$V = 188 \left( \frac{D}{W^{1/2}} \right)^{-1.4}$
		Lime stone	$V = 285 \left( \frac{D}{W^{1/2}} \right)^{-1.5}$
		Shale	$V = 133 \left( \frac{D}{W^{1/2}} \right)^{-1.35}$
		Sand stone	$V = 166 \left( \frac{D}{W^{1/2}} \right)^{-1.25}$
		Tunnel	$V = 61 \left( \frac{D}{W^{1/2}} \right)^{-1.22}$
		Bench	$V = 250 \left( \frac{D}{W^{1/2}} \right)^{-1.43}$
	Cube root scaling	Total	$V = 285 \left( \frac{D}{W^{1/3}} \right)^{-1.45}$
		Granite	$V = 362 \left( \frac{D}{W^{1/3}} \right)^{-1.47}$
		Gneiss	$V = 621 \left( \frac{D}{W^{1/3}} \right)^{-1.66}$
		Lime stone	$V = 380 \left( \frac{D}{W^{1/3}} \right)^{-1.59}$
		Shale	$V = 198 \left( \frac{D}{W^{1/3}} \right)^{-1.42}$
		Sand stone	$V = 487 \left( \frac{D}{W^{1/3}} \right)^{-1.48}$
Tunnel		$V = 88 \left( \frac{D}{W^{1/3}} \right)^{-1.27}$	
Bench		$V = 421 \left( \frac{D}{W^{1/3}} \right)^{-1.52}$	

설교통부(Ministry of Construction and Transportation, 2003; 2006) 제안식을 적용한 결과를 비교한 것이다.

그림에서 나타난 바와 같이 터널굴착에 의한 발파진동을 자승근식에 의해 분석한 경우에는 기존 제안식과 상대적으로 유사한 결과를 나타냈지만, 그 외의 경우에 있어서는 본 연구에서 파악된 발파진동 속도가 현재 통용되고 있는 건교부 발파진동 추정식에 의한 진동속도에 비하여 전반적으로 크게 발생하는 것으로 나타났다.

Fig. 2 및 Fig. 3은 터널에서의 발파자료를 이용하여 암종별로 자승근식과 삼승근식에 의한 결과를 도기한 것이다. 그림에서 보는 바와 같이 암석종류에 따라 발파진동 속도가 서로 상이하게 나타나 암종별 특성을 고려한 발파진동 추정식의 관리가 필요한 것으로 나타났다. 또한 자승근식을 이

용한 경우는 기존 건설교통부에 의한 추정값이 본 연구의 다양한 암석에 대한 추정값들 사이에 있는 것으로 나타났으나 삼승근식을 이용할 경우는 암석종류에 관계없이 전반적으로 건설교통부에 의한 추정식보다 더 큰 진동 값을 발생하는 것으로 나타났다.

Fig. 4 및 Fig. 5는 벤치에서의 발파자료를 이용하여 암종별로 자승근식과 삼승근식에 의한 결과를 도기한 것이다. 터널과는 달리 암종에 관계없이 자승근식과 삼승근식 모두에서 전반적으로 건설교통부 추정식보다 큰 값을 발생하는 것으로 나타났다.

Table 6 및 Fig. 6~7은 건설교통부 추정식, Kim et al. (1994)에 의해서 제시된 암종별 추정식(화강암, 편마암, 석회암), 그리고 본 연구에서 분석한 암종별 추정식(화강암,

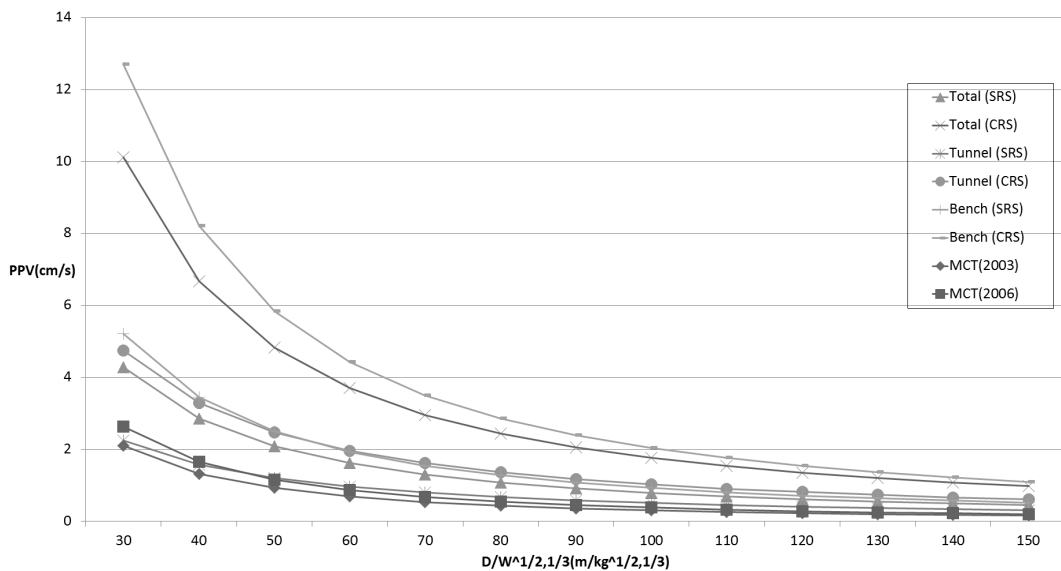


Fig. 1. Comparison of the results of regression analysis for excavation types (95% confidence)

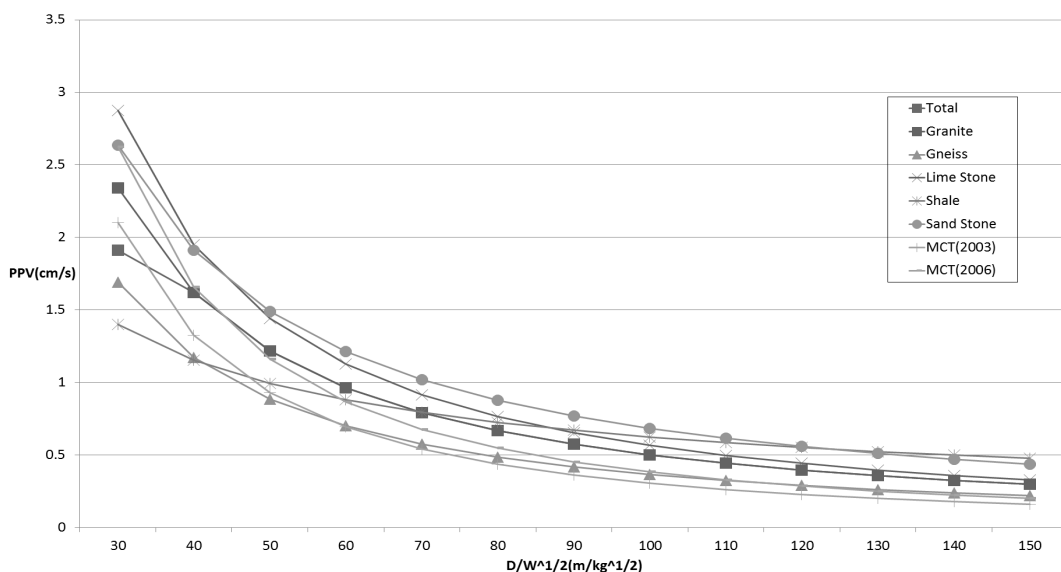


Fig. 2. Comparison of the results of regression analysis for rock types (Tunnel, 95% confidence, Square root scaling)

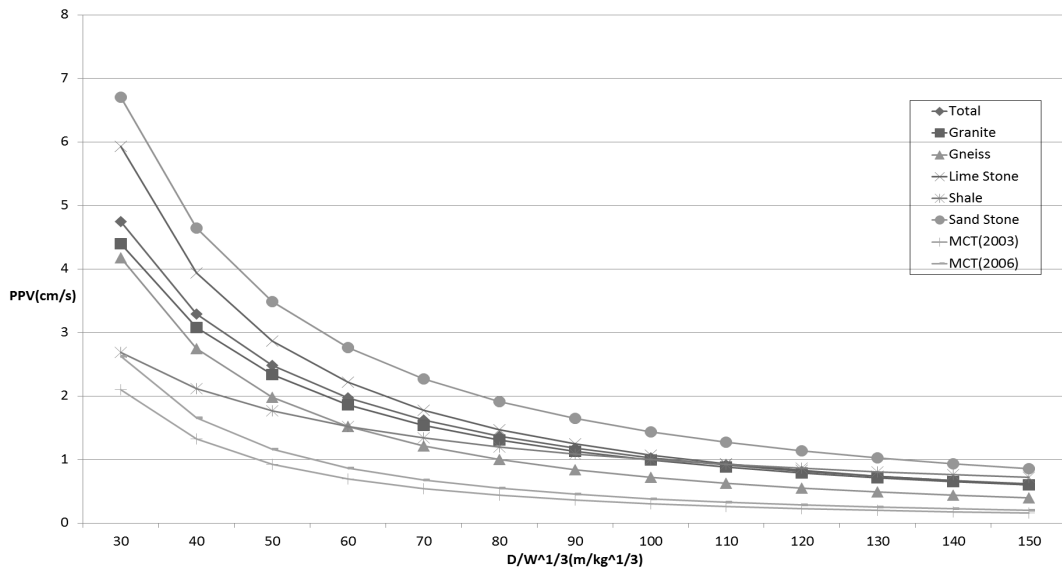


Fig. 3. Comparison of the results of regression analysis for rock types (Tunnel, 95% confidence, Cube root scaling)

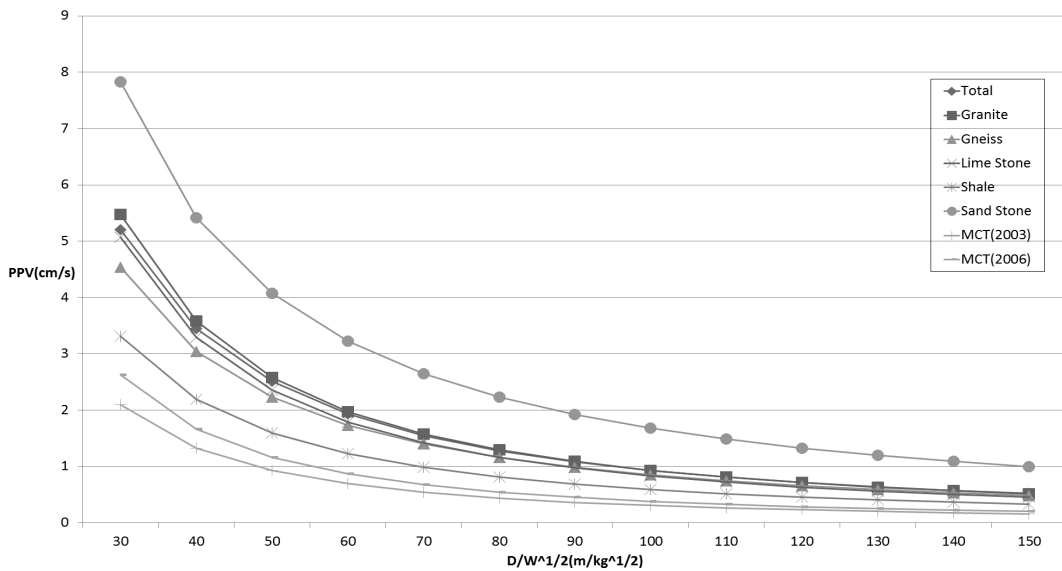


Fig. 4. Comparison of the results of regression analysis for rock types (Bench, 95% confidence, Square root scaling)

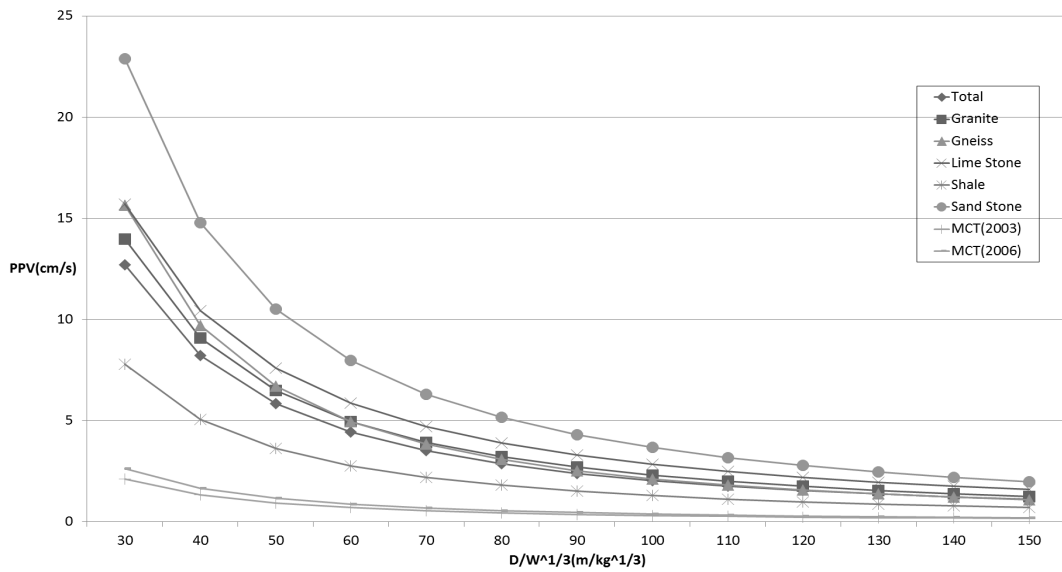


Fig. 5. Comparison of the results of regression analysis for rock types (Bench, 95% confidence, Cube root scaling)

Table 6. Comparison of the results of this study with Ministry of Construction and Transportation (2003, 2006) and Kim et al. (1994)

Criteria		Equation	
Ministry of Construction and Transportation (2003)		$V = 160 \left( \frac{D}{W^{1/2}} \right)^{-1.6}$	
Ministry of Construction and Transportation (2006)		$V = 200 \left( \frac{D}{W^{1/2}} \right)^{-1.6}$	
Kim et al. (Granite)		$V = 135.6 \left( \frac{D}{W^{1/3}} \right)^{-1.8}$	
Kim et al. (Gneiss)		$V = 114 \left( \frac{D}{W^{1/3}} \right)^{-1.7}$	
Kim et al. (Lime Stone)		$V = 273.8 \left( \frac{D}{W^{1/3}} \right)^{-1.6}$	
This study	Square root scaling	Granite	$V = 265 \left( \frac{D}{W^{1/2}} \right)^{-1.47}$
		Gneiss	$V = 188 \left( \frac{D}{W^{1/2}} \right)^{-1.4}$
		Lime stone	$V = 285 \left( \frac{D}{W^{1/2}} \right)^{-1.5}$
	Cube root scaling	Granite	$V = 362 \left( \frac{D}{W^{1/3}} \right)^{-1.47}$
		Gneiss	$V = 621 \left( \frac{D}{W^{1/3}} \right)^{-1.66}$
		Lime stone	$V = 380 \left( \frac{D}{W^{1/3}} \right)^{-1.59}$

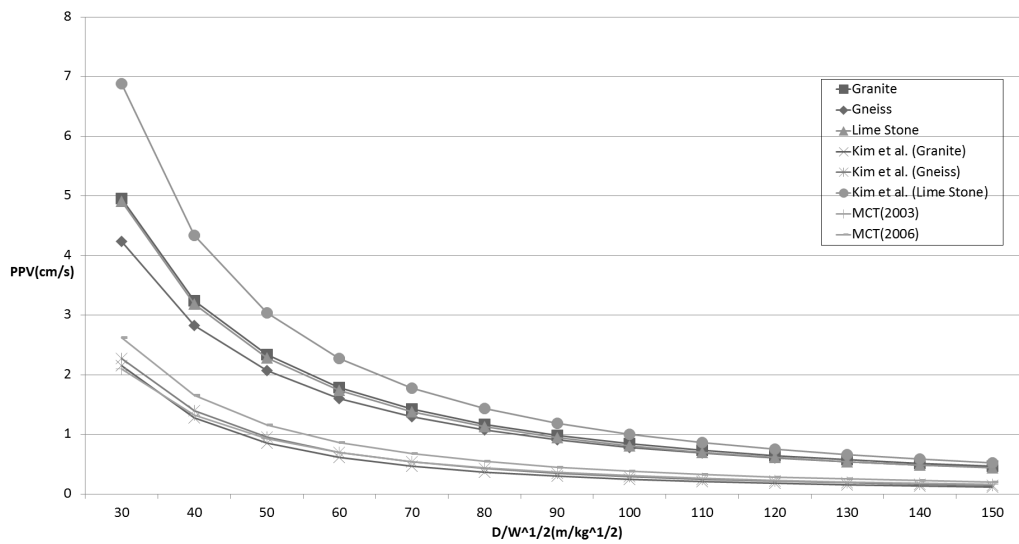


Fig. 6. Comparison of the results of this study with Ministry of Construction and Transportation (2003, 2006) and Kim et al. (1994) (95% confidence, Square root scaling)

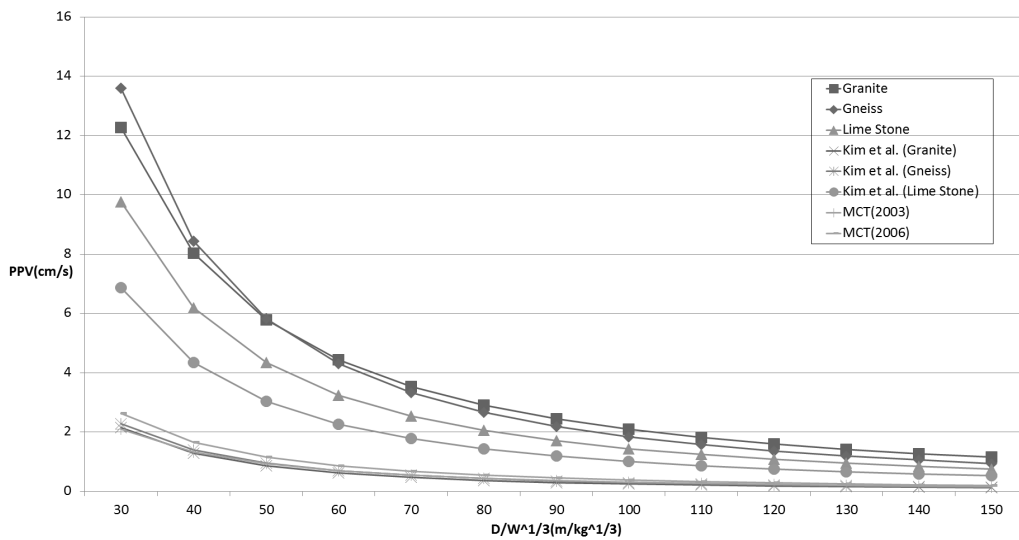


Fig. 7. Comparison of the results of this study with Ministry of Construction and Transportation (2003, 2006) and Kim et al. (1994) (95% confidence, Cube root scaling)



편마암, 석회암)의 결과를 자승근식 삼승근식에 따라 상호 비교한 것이다. 표 및 그림에서 보는 바와 같이 자승근식을 이용할 경우에는 본 연구에 의한 암종별 발파진동 추정값이 기존의 건설교통부에 의한 추정식 보다는 전반적으로 높게 나타났으나 Kim et al.(1994)에 의한 석회암에 대한 추정값 보다는 더 낮게 나타났다. 삼승근식을 이용할 경우에는 암종에 관계없이 본 연구에서 파악된 진동 값이 기존 제안식들과 비교하여 더 큰 값을 발생하는 것으로 나타났다.

#### 4. 조사된 암석 발파진동 특성에 대한 고찰

발파진동과 관련하여 현장의 암반 및 지층현황, 굴착종류, 자유면상태, 계측 당시의 발파상황, 사용화약, 계측장비 및 방법 등 다양한 요인들이 발파진동 속도에 영향을 미치게 된다. 따라서 본 연구에서는 상대적으로 많은 시험발파 자료를 확보하여 포괄적인 추세분석을 파악하려고 시도하였다.

본 연구에서 시험발파를 통해 수집된 총 1,789개의 자료를 이용하여 회귀분석한 결과 자승근식에 의한 결정계수( $R^2$ )는 0.62로 나타났고 삼승근식에 의한 결정계수는 0.63으로 나타나 큰 차이를 나타내지 않았으며 결정계수 또한 높지 않게 나타났다. 이러한 이유는 발파진동의 변동성이 앞서 언급한 다양한 요인에 의해서 크게 영향을 받았다는 것을 의미하며, 따라서 발파현장에서는 반드시 시험발파를 실시하고 그 현장의 특성에 맞는 발파진동 특성을 파악하여야 할 것으로 나타났다.

수집된 자료를 각각 터널발파 시의 경우와 벤치발파 시의 경우로 구분하여 회귀분석을 실시하고 굴착종류에 따른 영향 여부를 판단하고자 하였다. 또한 시험발파 자료를 암종별로도 구분하여 회귀분석 후 상호 비교하였다.

굴착종류로는 터널발파 자료가 377개, 벤치발파 자료가 1,412개로 조사되었으며 결정계수는 터널발파의 경우가 자승근식 및 삼승근식 적용 시 각각 0.59, 0.60, 벤치발파의 경우가 각각 0.62, 0.63으로 나타나 결정계수에 있어서는 큰 차이를 나타내지 않았다. 하지만 발파진동에 있어서는 터널발파와 벤치발파의 경우 뚜렷하게 차이를 발생하여 향후 굴착종류에 따른 영향을 고려하여 발파진동 추정을 할 필요가 있는 것으로 나타났다. 또한 암종별 발파진동 속도를 분석한 결과 본 연구에서 고려된 화강암, 사암, 셰일, 편마암, 석회암은 각각 발파진동 속도가 뚜렷하게 차이가 난다는 것을 파악하였으며 이를 토대로 향후 암종별 발파진동 추정식을 관리할 필요도 있는 것으로 나타났다.

뿐만 아니라 본 연구의 결과를 기존의 건설교통부나 기타 연구자에 의해서 제안된 연구결과와 상호비교 하였다. 비교

결과, 본 연구에서 파악된 발파진동 값이 터널발파에서 자승근식을 이용한 결과를 제외하곤 기존의 제안식에 의한 추정값보다 전반적으로 더 크게 발생하는 것으로 나타났다.

이와 같은 차이가 발생한 데는 여러 이유가 있겠지만 같은 암석종류로 분류된다 할지라도 강도특성, 절리특성, 지층분포 특성 등에 따라 발파진동이 서로 다르게 나타날 수 있다는 점이 하나의 원인이 된 것으로 판단된다. 또한 사용화약, 계측장비 및 방법도 그 차이에 영향을 미쳤을 것으로 판단된다. 따라서 향후 발파진동 추정에 관한 연구는 암석종류만이 아닌 암석의 강도 및 절리특성, 지층분포, 사용화약, 계측장비 및 방법 등의 영향을 종합적으로 고려하면서 더욱더 많은 자료를 분석해 관련 기준들을 면밀히 검토하고 필요하면 개선도 따라야 할 것으로 나타났다.

#### 5. 결 론

발파진동과 관련하여 현장의 암반 및 지층현황, 굴착종류, 자유면상태, 계측 당시의 발파상황, 사용화약, 계측장비 및 방법 등 여러 요인들이 발파진동 속도에 영향을 미치게 된다. 따라서 본 연구에서는 상대적으로 많은 시험발파 자료를 확보하여 포괄적인 추세분석을 파악하려고 시도하였으며 그 결과를 요약하면 다음과 같다.

- (1) 본 연구에서 시험발파를 통해 수집된 총 1,789개의 자료를 이용하여 회귀분석한 결과 자승근식에 의한 결정계수( $R^2$ )는 0.62, 삼승근식에 의한 결정계수는 0.63으로 나타나 큰 차이를 나타내지 않았으며 결정계수 또한 높지 않게 나타났다. 이러한 이유는 발파진동의 변동성이 현장의 암반 및 지층현황, 굴착종류, 자유면상태, 계측 당시의 발파상황, 사용화약, 계측장비 및 방법 등 다양한 요인 의해서 크게 영향을 받았다는 것을 의미하며, 따라서 발파현장에서는 반드시 시험발파를 실시하고 그 현장의 특성에 맞는 발파진동 특성을 파악해야 할 것으로 나타났다.
- (2) 굴착종류로는 터널발파 자료가 377개, 벤치발파 자료가 1,412개로 조사되었으며 발파진동에 있어서 터널발파와 벤치발파가 뚜렷하게 차이를 발생하여 향후 굴착종류에 따른 영향을 고려하여 발파진동 추정을 할 필요가 있는 것으로 나타났다. 또한 암석종류별 발파진동 속도를 분석한 결과 암석종류에 따라 큰 차이를 발생하여 향후 암석종류별 발파진동 추정식을 관리할 필요도 있는 것으로 나타났다.
- (3) 기존의 건설교통부나 기타 연구자에 의해서 제안된 연

구결과와 상호비교 결과, 터널발파에서 자승근식을 이용한 결과는 기존 제안식과 유사한 결과를 나타냈으나 그 외의 경우에는 본 연구의 시험발파 자료로부터 파악한 발파진동 값과 기존의 제안식에 의한 추정값 사이에는 상당한 차이가 있는 것으로 나타났다. 이와 같은 차이가 발생한 데는 현장특성 등을 포함한 여러 이유가 있겠지만 같은 암석종류로 분류된다 할지라도 강도특성, 절리특성, 지층분포 특성 등에 따라 발파진동이 서로 다르게 나타날 수 있다는 점이 하나의 원인이 된 것으로 판단된다. 또한 굴착종류, 사용화약, 계측장비 및 방법도 그 차이에 영향을 미쳤을 것으로 판단된다.

(4) 따라서 향후 발파진동 추정에 관한 연구는 암석종류만이 아닌 암석의 강도 및 절리특성, 지층분포, 굴착종류, 사용화약, 계측장비 및 방법 등의 영향을 종합적으로 고려하면서 더욱더 많은 자료를 분석해 관련 기준들을 면밀히 검토하고 필요하면 개선도 따라야 할 것으로 판단된다.

## References

1. Adhikaria, G. R., Theresraja, A. I., Venkatesha, H. S., Balachxandera, R. and Guptaa, R. N. (2004), Ground vibration due to blasting in limestone quarries, *International Journal for Blasting and Fragmentation*, Vol. 8, Issue 2, pp. 85~94.
2. Ambraseys, N. R. and Hendron, A. J. (1968), *Dynamic behaviour of rock masses*, Rock mechanics in engineering, practices, London, Wiley, pp. 203~207.
3. Chun, B. S. and Oh, M. Y. (1995), A study on the estimation of blast vibration velocity using R.Q.D, *Journal of Korean Society of Mineral and Energy Resources Engineers*, Vol. 15, No. 4, pp. 983~990 (in Korean).
4. Dowding, C. H. (1985), *Blast vibration monitoring and control*, Prentice-Hall, INC, Englewood Cliffs, NJ, pp. 28~30.
5. Duvall, W. I. and Devine, J. F. (1968), *Avoiding damages by air blasts and ground vibrations from blasting*, Surface Mining, AIMMPE Inc, NY., pp. 398~412.
6. Duvall, W. I. and Fogelson, D. E. (1962), *Review of criteria for estimating damages to residences from blasting vibrations*, R.I. 5968, USBM., pp. 1~15.
7. Khandelwal, M. and Singh, T.N. (2009), Prediction of blast-induced ground vibration using artificial neural network, *IJRMMS*, Vol. 46, Issue 7, pp. 1214~1222.
8. Kim, D. S., Lee, C. I. and Lee, H. K. (1991), A study on velocity and spectral analysis for the allowable peak particle velocity of blast vibration, *Journal of The Korean Society of Mineral and Energy Resources Engineers*, Vol. 28, No. 6, pp. 444~455 (in Korean).
9. Kim, S. I., Jung, S. S. and Cho, H. Y. (1994), The reliability of blast vibration equation, *Journal of Korean Society of Mineral and Energy Resources Engineers*, Vol. 14, No. 3, pp. 573~582 (in Korean).
10. Langefors, Ulf., Kihlstrom, B. and Westerberguvall, H. (1958), *Ground vibrations in blasting*, Water Power, February, pp. 335~424.
11. Lee, K. W., Kim, M. K. and Shin, H. S. (1984), A study on the effects of explosives, rock strength, and blasting types on the blasting vibrations, *The Korean Society of Mineral and Energy Resources Engineers*, Vol. 21, No. 4, pp. 334~339 (in Korean).
12. Lim, H. W. and Kim, J. D. (1992), On the magnitude and frequency characterization of blast - induced vibration, *Journal of the Korean Society of Mineral and Energy Resources Engineers*, Vol. 29, No. 3, pp. 146~157 (in Korean).
13. Ministry of Construction and Transportation (MCT) (2003), *Provisional guidelines for rock blasting design and test blasting*, Ministry of Construction and Transportation, pp. 1~21.
14. Ministry of Construction and Transportation (MCT) (2006), *Final report of guidelines for rock blasting design*, Ministry of Construction and Transportation, pp. 47~72.
15. Nicholls, H. R., Johnson, C. F. and Duvall, W. I. (1971), *Blasting vibrations and their effects on structures*, Bulletin 656, U.S.B.M., pp. 1~73.
16. Roy, P. P. (1993), Putting ground vibration predictors into practice, *J. Colliery, Guardian*, Vol. 241, pp. 63~67.
17. Seoul Metropolitan Rapid Transit Corporation (1984), *Research report for establishing blating-induced vibration formula and determining guidelines for controlled blasting*, Seoul Metropolitan Rapid Transit Corporation, pp. 1~168.
18. Singh, T. N. (2004), Artificial neural network approach for prediction and control of ground vibrations in mines, *Min. Technol, Sec. A*, Vol. 113, Issue 4, pp. 251~256.
19. Yang, H. S. and Ju, J. S. (1990), On the vibration characteristics and determination of site constants for surface blasting, *Journal of Korean Society of Mineral and Energy Resources Engineers*, Vol. 27, No. 4, pp. 316~323 (in Korean).