

노천발파 표준공법의 진동예상식

양형식, 김원범, 최미진¹⁾, 장선종²⁾

Particle Velocity Equation for Korean Surface Blasting Type

Hyung-Sik Yang, Won-Beom Kim, Mi-Jin Choi and Sun-Jong Jang

ABSTRACT. Particle Velocity Equations were suggested in this paper for Korean surface blasting types, which were developed by Korean Society for Explosive Engineers (KSEE). Standard charges per delay for types and distances also were determined. USBM equation which was adopted by MOCT (Korean Ministry of Construction and Transportation) shows many problems for Korean situations.

Key words : surface blasting, standard types, particle velocity equation

초 록. 대한화약발파공학회 제정 노천 발파 표준공법에 따른 진동식을 산정하기 위하여 국내자료를 주로 이용하여 표준공법에 적합한 진동식을 제시하고 공법별, 거리별 표준 장약량을 제시하였다. 건교부 기준식으로 사용되는 미광 무국(USBM) 식의 경우 같은 환산거리에 대한 최대 진동속도가 낮게 평가되어 건교부 안에 의한 설계는 환경문제 발생 개연성이 상존함을 알 수 있다.

핵심어 : 노천발파, 표준공법, 진동예상식

1. 서 론

지반진동은 지표면 및 지반내부에 위치한 각종 진동원의 가진 작용으로 지반으로 전달된 진동에너지가 탄성과 에너지의 형태로 지반이라는 전파 매질을 통하여 전파되어 가는 과정에서 지반을 구성하는 입자들이 운동을 일으키는 물리적 현상이다.

대한화약발파공학회(2002)는 발파공사의 난이도와 작업능률을 고려하여 발파공법을 분류하고 원활한 시공과 형평에 맞는 공사비를 결정하여 균형있는 공사관리를 할 수 있도록 노천발파에 대한 표준공법을 제정하여 공포하였다. 이와 유사한 모양으로 건설교통부(2002)에서도 시안을 발표하였다(표 1). 그러나 이에 따른 진동식을 USBM의 기준으로 적용하고 있어 과장약 등 문제를 일으키고 있다. 이에 본 연구에서는 국내 노천발파 현장에서 계측된 자료를 이용하여 노천발파 표준공법에 따른 진

동식을 산정하려 한다.

2. 노천발파 표준공법 분류

노천발파표준공법은 폭약을 사용하지 않고 미진동파쇄기 등을 사용하여 균열을 형성하고 대형 브레이커로 2차 파쇄하는 특수파쇄공법, 소량의 폭약으로 암반에 균열을 발생시킨 후 대형 브레이커로 2차 파쇄하는 정밀진동제어 발파 (Type I), 발파영향권 내에 보안물건이 존재하여 "시험발파" 결과에 의해 발파설계를 실시하여 규제기준을 준수할 수 있는 진동제어발파(Type II, Type III), 1공당 최대장약량이 발파규제기준을 충족시킬 수 있을 만큼 보안물건과 이격된 영역에 대해 적용하는 일반발파 (Type IV, Type V), 발파영향권내에 보안물건이 전혀 존재하지 않는 산간오지 등에서 발파효율만을 고려하는 대발파(Type VI)의 7가지 공법으로 화약,

1) 전남대학교

2) 한국기술개발(주)

접수일 : 2004년 9월 13일

표 1. 표준발파공법 분류

구분	특수 파쇄공법I	정밀진동제어발파		진동제어발파		일반발파		대발파
		Type I	Type II	Type III	Type IV	Type V	Type VI	
공법개요	미진동 파쇄기 등을 사용하여 균열을 형성하고 대형 브레이커로 2차 파쇄 하는 공법	소량의 폭약으로 암반에 균열을 발생시킨 후, 대형 브레이커에 의한 2차파쇄를실시하는 공법	발파영향권 내에 보안물건이 존재 하여 “시험발파”결과에 의해 발파설계를 실시하여 규제기준을 준수할 수 있는 공법	1공당 최대장약량이 발파규제기준을 충족시킬 수 있을 만큼 보안물건과 이격된 영역에 대해 적용하는 공법		발파영향권내에 보안물건이 전혀 존재하지 않는 산간오지 등에서 발파효율 만 고려하는 공법		초유폭약 등 벌크폭약
화약	폭약이 아닌 화약류	에밀전 계열폭약	에밀전 또는 GD 계열 폭약		에밀전 또는 GD 계열 폭약			
기폭		전기뇌관 또는 비전기식 뇌관						
천공직경		ø45 mm 이하	ø45-76 mm		ø25-45 mm	ø64-76 mm	ø76 mm 이상	
천공장비		소형 크롤러드릴	크롤러 드릴		인력식착암기	크롤러 드릴	대형크롤러드릴	
소할처리		공기압축기식 또는 유압식 드릴 선택 사용						
버력처리장비		대형 브레이커	브레이커		불필요	소할발파		
발파패턴		백 호우		백 호우, 도자	백 호우	백 호우, 도자	도자(소벨)	
발파패턴		정밀진동 제어 발파	진동제어발파		일반발파			
천공깊이(m)		소규모	중규모	인력식	기계식	대규모		
최소저항선(m)		1.7-2.3(2.0)	2.3-2.0(2.7)	3.0-3.5(3.2)	0.6-1.5(1.1)	3.5-8.0(5.7)	8.0이상(11.5)	
최소저항선(m)		0.8이하	0.8-1.2(1.0)	1.2-1.6(1.4)	0.6-1.0(0.8)	1.5-2.0(1.7)	2.0이상	
천공간격(m)		0.8이하	1.0-1.4(1.2)	1.4-1.8(1.6)	0.6-1.0(0.8)	1.7-2.2(1.9)	2.5이상	
계측관리		필수		선택				
발파보호공		필수		선택		불필요		

주1. 특수파쇄공법은 미진동파쇄기에 의한 공법, 플라즈마 발파공법, 기계식 할암공법, 약액주입공법 등 폭약을 사용하지 않고 암반을 파쇄, 절취하는 공법을 통칭한다.

표 2. 표준발파공법 설계제원

구분	단위	정밀진동 제어발파	진동제어발파		일반발파		대발파
		Type I	Type II	Type III	Type IV	Type V	Type VI
설계장약량	kg/delay	0.5 이하	0.5-1.6	1.6-4.8	0.12-0.35	4.8-15	15 이상
적용굴착공법		정밀진동제어 발파+대형 브레이커	진동 제어발파	진동 제어발파	일반발파	일반발파	일반발파
천공장비		소형 크롤러 드릴		크롤러 드릴	인력식착암기	크롤러 드릴	대형 롤러드릴
천공직경	mm	45 이하	45	76	38	76	76 이상
계단높이	m	-	2.4	2.6	1	4.8	10
천공장	m	2	2.7	3.2	1.1	5.7	11.5
최소저항선	m	0.8 이하	1	1.4	0.8	1.7	2.0 이상
천공간격	m	0.8 이하	1.2	1.6	0.8	1.9	2.5 이상
공당장약량	kg/공	0.3	1	2	0.3	5	20
비천공장	m/m3	1.56	0.94	0.55	1.72	0.37	0.21
비장약량	kg/m3	0.24	0.35	0.34	0.48	0.32	0.36
비뇌관량	ea/m3	0.78	0.35	0.17	1.56	0.06	0.02
공당파쇄량	m3/공	1.28	2.88	5.83	0.64	15.5	55

주 1. 이 발파패턴은 개략공사비 산출하기 위하여 표준발파공법의 대표적인 값을 적용한 것이며 실시 설계는 시험발파 후 발파패턴을 확정된 다음 본 적산 근거에 의하여 공사비를 산출한다.

주 2. 시험발파 결과는 감독원의 승인을 받아 시행한다.

기폭방법, 천공직경, 천공장비, 소할처리, 버력처리 장비, 발파패턴, 천공깊이(m), 최소저항선(m), 천공 간격(m), 계측관리, 발파보호공의 유무 등으로 구분하여 표 1과 같이 제시하였으며, 이에 따른 설계 제원을 설계장약량, 적용굴착방법, 천공장비, 천공 직경, 계단높이, 천공장, 최소저항선, 천공간격, 공 당장약량, 비천공장, 비장약량, 비너관량, 공당파쇄 량으로 구분하여 표 2에 나타내었다.

3. 진동식 산정

3.1 산정을 위한 자료

노천발파 표준공법에 따른 진동식 산정을 위하여 국내노천 건설현장 및 석산개발 27개소에서 계 측된 1671개의 발파진동 계측 자료(양형식, 1982)와 Dowding(1985)이 미국 내 채석장 및 문헌연구에 의해서 정리한 30개 자료를 합하여 총 1701개의 자 료를 이용하였다.(표 3)

표준 발파 패턴에서 제시한 지발당장약량은 설 계에 적용하기 위한 표준을 제시한 것으로서 실제 현장에서 같은 조건의 발파제원을 가진 발파현장 을 찾는다는 것은 시험발파에 의한 계측 외에 현 실적으로 어려움이 있다. 그러나 현재 국내에서 적 용되고 있는 Devine 식의 경우 진동속도의 결정에 있어서 지발당장약량과 거리의 비인 환산거리의 향으로 나머지 변수를 포함하고 있다고 할 수 있 다. 표 4는 표준발파공법 설계에 적용된 지발당장 약량과 계측 시 조사된 지발당장약량을 비교한 것 으로 유사한 장약량의 결과들을 분류하여 자승근 환산거리 진동예상식을 산정하였다.

표 4. 표준발파공법 설계 및 계측 자료의 지발당 장약량

구 분	단위	정밀 진동 제어 발파	진동제어발파			일반발파		대발파
		Type I	Type II	Type III	Type IV	Type V	Type VI	
설계	Kg/delay	0.5 이하	0.5~1.6	1.6~4.8	0.12~0.35	4.8~15	15 이상	
지발당장약량 계측 자료의 지발당장약량		0.13~0.5	0.6~1.6	1.75~4.5	0.13~0.31	5~15	18~9956	

표 3. 노천발파 표준공법에 따른 진동식 산정에 사 용된 자료

현장명	자료수	현장명	자료수
Dowding	30	고창-담양	18
남원1	5	거금도	13
순천	42	덕례	18
여천1	105	장흥	19
여천2	328	삼원	34
여천3	507	여수	33
S시멘트 1차	39	영광-해보	27
S시멘트 2차	39	전주1	23
진월-광영	18	전주2	20
서수-군산1	33	두암동	115
서수-군산2	32	남원2	23
서수-군산3	12	덕남	34
기호	30	고창	38
진도	33	진월동	33
합 계	1701		

이들 계측 자료들은 지반진동의 파형이 양호하 며 계측이 충실히 이루어진 자료들이다.

발파진동 측정기는 Instantel사의 DS 477, 677, 077 및 Blastmate Plus Series를 사용하였으며 9대 내외의 계측기를 한꺼번에 사용하여 발파외적인 요 인을 줄이려 노력하였다.

3.2 해석 결과

표 5는 발파패턴별 진동예상식을 50, 95 및 99% 의 신뢰구간으로 나누어 정리한 것이다.

각 발파공법 별 진동 전파특성을 비교하기 위하 여 표 5의 95% 진동예상식에 대한 환산거리별 최 대 예상진동속도를 계산하여 표 6에 제시하였다.

표 5. 발파패턴별 진동예상식

구분	회귀식	r2
Type I	50% : $v = 1710$ SD-1.609 95% : $v = 4240$ SD-1.609 99% : $v = 6170$ SD-1.609	0.82
Type II	50% : $v = 880$ SD-1.489 95% : $v = 2090$ SD-1.489 99% : $v = 3000$ SD-1.489	0.77
Type III	50% : $v = 730$ SD-1.492 95% : $v = 1870$ SD-1.492 99% : $v = 2760$ SD-1.492	0.72
Type IV	50% : $v = 4720$ SD-1.847 95% : $v = 11200$ SD-1.847 99% : $v = 15900$ SD-1.847	0.81
Type V	50% : $v = 610$ SD-1.393 95% : $v = 1540$ SD-1.393 99% : $v = 2260$ SD-1.393	0.79
Type VI	50% : $v = 655$ SD-1.420 95% : $v = 1480$ SD-1.420 99% : $v = 2080$ SD-1.420	0.84

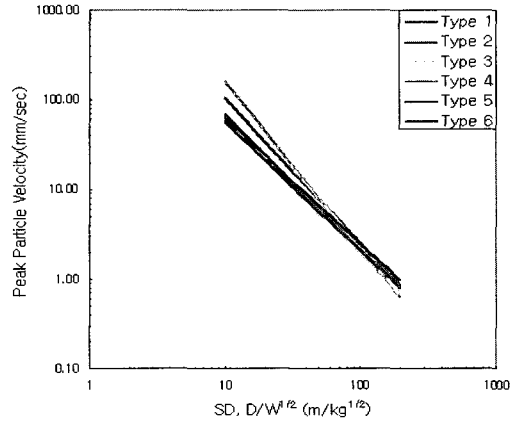


그림 1. 발파패턴별 환산거리에 따른 최대 진동예상식

표 6. 95% 수준 최대 예상진동속도 (mm/s)

SD	Type I	Type II	Type III	Type IV	Type V	Type VI
10	104	67.9	60.3	159	62.4	56.3
20	34.2	24.2	21.5	44.1	23.8	21.0
40	11.2	8.62	7.63	12.3	9.05	7.87
60	5.84	4.71	4.16	5.80	5.14	4.42
80	3.68	3.07	2.71	3.41	3.44	2.94
100	2.57	2.20	1.94	2.26	2.52	2.14
120	1.91	1.68	1.48	1.61	1.96	1.65
140	1.49	1.33	1.18	1.21	1.58	1.33
160	1.21	1.09	0.96	0.95	1.31	1.10
180	1.00	0.92	0.81	0.76	1.11	0.93
200	0.84	0.78	0.69	0.63	0.96	0.80

그림 1은 발파패턴별 환산거리에 따른 최대 진동속도를 그래프로 작성한 것이다. 자승근 환산거리 10의 경우에 최대 진동속도 분포가 TypeVI < Type III < TypeV < TypeII < Type I < TypeIV의 형태를 나타내었으며 환산거리 200의 경우에는 Type IV < TypeIII < TypeII < TypeVI < Type I < TypeV의 형태를 나타내었다.

발파로 인하여 발생하는 총에너지 중에서 0.5~20%가 탄성파로 변환되어 발파진동으로 소비되는 것으로 알려지고 있다. Type I과 Type IV의 경우 각각 지발당장약량이 0.13~0.50 kg과 0.13~0.31 kg

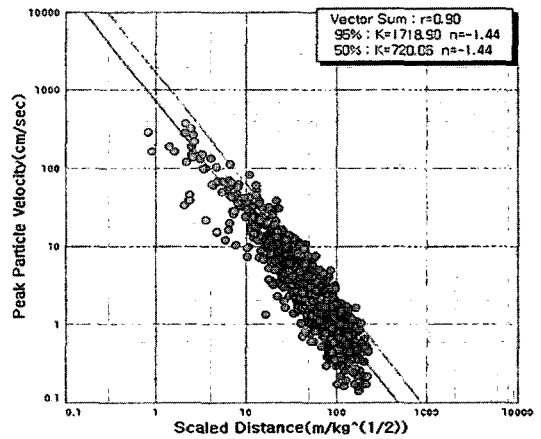


그림 2. 국내 자료에 의한 발파진동 예상식

의 소장약으로 파쇄에 쓰이는 화약의 동적효과 보다는 정적효과에 의한 발파로서 암반에 전파되는 잔류에너지의 양이 많으므로 초기 진동은 크나 총 에너지량이 작아 감쇠가 큰 것으로 판단된다.

자승근 환산거리에 따른 최대 진동속도의 경우 Type I과 Type IV를 제외한 나머지 발파 공법은 감쇠특성에 별다른 차이를 확인할 수 없다. 따라서

발파 예비설계에 사용하기 위한 진동예상식은 전체 진동기록을 이용하여 산출하였다.

다음은 본 연구에서 산정된 발파진동식과 자승근 환산거리에 따른 진동속도 그래프이다.

$$50\% \ v = 720 \left(\frac{D}{\sqrt{W}} \right)^{-1.44} \quad r=0.90 \quad (1)$$

$$95\% \ v = 1720 \left(\frac{D}{\sqrt{W}} \right)^{-1.44} \quad r=0.90 \quad (2)$$

여기서, v : 진동속도 (cm/s)

D : 폭원에서 이격거리 (m)

W : 지발당 장약량 (kg/delay)이다.

노천발파에 대한 표준공법에 제시된 설계 지발당 장약량에 대한 근접 가능 보안 물건에 거리를 제시하고자 발파 공법별 거리와 보안물건에 대한 허용진동기준을 1.0, 3.0, 5.0 mm/s로 하여 허용 가능한 이격거리를 표 7에 제시하였다. 이 표는 발파 공법별 진동예상식으로부터 산정하였다.

발파진동식은 시험발파 등을 통하여 결정되는 것이나 설계단계에서는 진동예측을 위한 기준 진동

표 7. 설계 장약량에 대한 허용속도 별 이격 거리 (m)

구분	장약량(kg)	허용속도(mm/s)		
		1.00	3.00	5.00
Type I	0.25	90	45	33
	0.50	127	64	47
Type II	0.75	141	70	50
	1.00	170	81	58
	1.25	190	91	64
Type III	1.60	215	103	73
	2.00	221	106	75
	3.00	270	129	92
	4.00	312	150	106
Type IV	4.80	342	164	116
	0.25	78	43	33
Type V	0.35	92	51	38
	5.00	435	198	137
	7.00	514	234	162
Type VI	10.00	615	279	194
	15.00	753	342	237
	15.00	662	306	213
Type VI	20.00	765	353	246
	25.00	855	394	275
	30.00	937	432	301

추정식이 필요하다. 건교부에서는 국내 암발파에 미광무국식($k=160, n=1.6$ 상수)을 적용한 발파진동 추정식을 기준으로 사용하였다.

$$v = 160 \left(\frac{D}{\sqrt{W}} \right)^{-1.60} \quad (3)$$

건교부에서 제시한 발파진동 추정식과 본 연구에서 수행한 표준공법별 발파진동 추정식을 이용하여 계산한 최대 진동속도로 비교하였다(표 8).

표 8. 자승근 환산거리에 따른 최대진동속도(mm/s)

SD	Type I	Type II	Type III	Type IV	Type V	Type VI	건교부
10	104.3	67.9	60.3	158.6	62.4	56.3	40.2
20	34.2	24.2	21.5	44.1	23.8	21.1	13.3
40	11.2	8.6	7.6	12.3	9.1	7.9	4.37
60	5.8	4.7	4.2	5.8	5.1	4.4	2.29
80	3.7	3.1	2.7	3.4	3.4	3.0	1.44
100	2.6	2.2	2.0	2.3	2.5	2.1	1.01
120	2.0	1.7	1.5	1.6	2.0	1.7	0.75
140	1.5	1.3	1.2	1.2	1.6	1.3	0.59
160	1.2	1.1	1.0	1.0	1.3	1.1	0.48
180	1.0	1.0	0.8	0.7	1.1	0.9	0.39
200	0.8	0.8	0.7	0.6	1.0	0.8	0.33

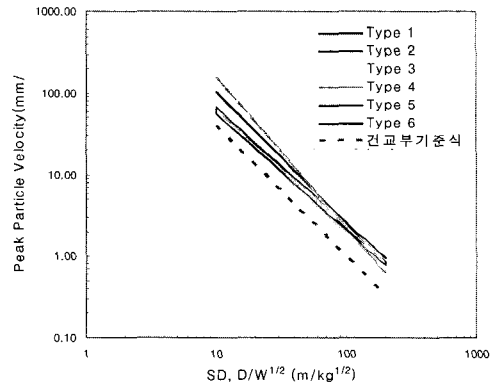


그림 3. 발파패턴별 환산거리에 따른 최대진동속도

표 9. 95% 발파진동 예상식으로부터 구한 거리-지발당 장약량 조건표

(단위: kg/delay)

TYPE IV (일반발파)

적용 공법	대상 이격(m)	0.1 cm/s 가축류등	0.2 cm/s 문화재	0.3 cm/s 가옥(조적)	0.5 cm/s 가옥(RC조)	1.0 cm/s 공장건물	5.0 cm/s 철골구조	적용 공법
TYPE I 정밀진동 제어발파	10	0.00	0.01	0.01	0.03	0.08	0.73	Type II
	20	0.01	0.03	0.06	0.12	0.31	2.9	TYPE III
	30	0.03	0.08	0.13	0.27	0.71	6.6	TYPE V
	40	0.05	0.13	0.24	0.48	1.26	11.8	일반발파
	50	0.08	0.21	0.37	0.75	2.0	18.4	TYPE VI 대발파
	60	0.12	0.30	0.53	1.1	2.8	26.5	
	70	0.16	0.41	0.72	1.5	3.9	36.0	
	80	0.21	0.54	0.95	1.9	5.0	47.0	
	90	0.26	0.68	1.2	2.4	6.4	59.5	
	100	0.32	0.84	1.5	3.0	7.9	73.5	
	110	0.39	1.0	1.8	3.6	9.5	88.9	
	120	0.46	1.2	2.1	4.3	11.3	105.8	
130	0.54	1.4	2.5	5.1	13.3	124.2		
140	0.63	1.6	2.9	5.9	15.4	144.1		
TYPE II 진동제어 발파	150	0.72	1.9	3.3	6.8	17.7	165.4	
	160	0.82	2.2	3.8	7.7	20.1	188.2	
	170	0.93	2.4	4.3	8.7	22.7	212.4	
	180	1.0	2.7	4.8	9.7	25.5	238.1	
	190	1.2	3.0	5.3	10.8	28.4	265.3	
	200	1.3	3.4	5.9	12.0	31.4	294.0	
	210	1.4	3.7	6.5	13.2	34.7	324.1	
	220	1.6	4.1	7.1	14.5	38.0	355.7	
TYPE III 진동제어 발파	230	1.7	4.4	7.8	15.9	41.6	388.8	
	240	1.8	4.8	8.5	17.3	45.3	423.3	
	250	2.0	5.3	9.2	18.8	49.1	459.4	
	260	2.2	5.7	10.0	20.3	53.1	496.8	
	270	2.3	6.1	10.8	21.9	57.3	535.8	
	280	2.5	6.6	11.6	23.5	61.6	576.2	
	290	2.7	7.1	12.4	25.2	66.1	618.1	
	300	2.9	7.6	13.3	27.0	70.8	661.5	

그림 3은 발파패턴별 환산거리에 따른 최대 진동속도를 그래프로 작성한 것이다. 건교부 기준식과 본 연구에서 수행한 장약규모에 따른 진동예상식을 비교해보면 건교부 기준식의 경우, 같은 환산거리에 대해서 최대 진동속도가 낮게 평가되고 있음을 알 수 있다.

표 9는 본 연구에서 산정한 95% 발파진동 예상식의 거리에 따른 지발당 장약량 조건표이다. 건교

부 기준의 식과 본 연구에서 산정된 50% 진동 예상식을 이용한 거리에 따른 장약량을 비교해보면 이격거리에 따른 장약량이 거의 비슷하다.

95% 진동 예상식을 이용한 거리에 따른 장약량을 보면 이격거리가 300 m인 경우 건교부 기준의 경우 가축류 등에는 type V의 일반발파를 해야 하나 95% 평균 진동예상식의 경우 type III의 진동제어발파로 가능하다. 즉 건교부 기준의 거리에 따른

장약량을 사용하면 진동·소음을 유발할 가능성이 클 것으로 사료된다.

4. 결론

대한화약발파공학회에서 제정 공포한 노천 발파 표준공법에 따른 진동식을 산정하기 위하여 국내노천 건설현장 및 석산개발 27소에서 계측된 1671개의 발파진동 계측 자료 등 총 1701개의 자료를 이용 표준공법에 적합한 진동식을 제시하였다. 본 연구를 통하여 구한 중요한 결론은 다음과 같다.

1. 주로 발파규모에 따라 발파공법별 지반진동의 계측자료들을 분석하였고 이에 따른 기준 진동식을 산정하였다. 진동식은 건설교통부가 채택하고 있는 미국 USBM 기준보다 높은 범위에서 진동수준이 형성되고 있음을 보여주고 있으며 발파공법별 입지상수의 차이가 크지 않음을 보여주고 있다. 이에 따라 본 연구에서는 발파 예비설계에 적용할 수 있는 산정식 $v = 1720 \left(\frac{D}{W} \right)^{-1.44}$ 과 공법별, 거리별 표준 장약량을 제시하였다.
2. Type I 과 Type IV의 경우 지발당장약량이 0.13~0.50의 소장약으로 화약의 동적효과 보다는 정적효과에 의한 발파로서 암반에 전파되는 잔류에너지의 양이 많으므로 초기 진동은 크나 총에너지량이 작아 감쇠가 큰 것으로 판단된다. 나머지 발파 공법은 감쇠특성에 별다른 차이를 확인할 수 없다.
3. 건교부 기준식과 장약규모에 따른 자승근 환산거리에 대한 최대진동속도를 비교해보면 건교부 기준식의 경우 같은 환산거리에 대한 최대 진동속도가 낮게 평가되고 있음을 알 수 있다. 즉 건교부 안에 의한 설계는 환경문제 발생의 개연성이 상존한다.

본 연구에서 얻어진 결론 중에서 가장 중요하고 현실적으로 반영되어야 할 사항은 건설교통부 제안 방법의 문제점과 그 해결책이다.

1. 발파진동은 건설교통부에서 제안한 방법에서는 미국 USBM의 기준이 이용되고 있으나 이는 대규모 일반발파에 국한된 사례이고 또 평균 예상식을 이용한 것이기 때문에 거의 매번 심각한 진동환경문제를 유발하도록 되어 있다. 마땅히 우리나라 사례로 작성된, 95% 수준 이상의 예상식이 사용되어야 한다.
2. 건설교통부 제안 발파공법은 일반적으로 진동수준이 높게 나타난다. 이는 USBM 평균예상 공식의 적용으로 인한 필연적인 결과이며 파쇄에는 문제가 없으나 결국 과장약으로 인한 화약량의 과다소모와 진동문제로 귀결된다. 발파공법은 파쇄원리와 실제 시공에 적합하게 수정되어야 한다.

참 고 문 헌

1. 건설교통부 감사관실, 2002, 암발파공법 설계적용 기준개정안, 건설교통부.
2. 대한화약발파공학회, 2002, 노천발파 표준공법, 2002년 추계학술발표회.
3. 양형식, 1992, 지표발파의 진동특성에 관한 기초연구, 터널과 지하공간, Vol. 2, No. 2, pp. 199-211.
4. Dowding, C. H., 1985, Blast Vibration Monitoring and Control, Prentice Hall, Englewood Cliffs, U.S.A., p. 297.