

인공지진 발생을 위한 대규모 시추공 시험발파 사례연구

정주환¹⁾, 최병희^{1)*}, 류창하¹⁾, 민형동²⁾, 최형빈³⁾

A Case Study on a Large Scale Borehole Test Blasting to Generate Man-made Earthquake

Ju-Hwan Jeong, Byung-Hee Choi, Chang-Ha Ryu, Hyung-Dong Min and Hyung-Bin Choi

Abstract In the process of identifying the earth's crust structures to accurately locate the seismic epicenter, man-made earthquakes need to be generated. Such a large-scale ground vibration can be generated by a deep borehole blasting, but it can also accompany some environmental impacts on the surroundings. In this respect, a borehole test blasting was carried out to determine the maximum charge weight that could be used without affecting the various structures around the blast site. Total 400kg of gelatine-type dynamites was used in the test blast. As a result, a prediction equation for ground vibrations was derived from the measured data. With the allowable level of 3.0 mm/s for residential structures, the maximum charge weight was determined to be 677kg if military structures near the site were considered. But if the military structures were not considered, it was found that up to 2100kg of explosives could be used without affecting old houses in the nearby village.

Key words Man-made earthquake, Ground vibration, Borehole blasting, Allowable level

초 록 지진 발생 시 진앙 추적에 필요한 지각구조 특성 규명과정에서는 인공지진을 발생시킬 필요가 있다. 이런 정도의 큰 지반진동은 대규모 시추공 발파를 통해 발생시킬 수 있으나 이와 같은 대규모 발파는 대부분 주변에 대한 환경적인 악영향을 미치게 된다. 이런 맥락에서 시추공 시험발파를 통해 발파장소 주변의 다양한 구조물에 영향이 없는 최대 장약량을 결정하였다. 시험발파에서는 젤라틴 다이내마이트 400kg을 사용하였다. 시험 결과 측정된 자료로부터 지반진동 수준에 대한 예측식을 유도하였다. 주거용 구조물에 대한 지반진동 허용수준을 3.0mm/s로 설정하였을 때 발파장소 부근의 군용 구조물을 고려한 경우에는 사용 가능한 최대 장약량이 677kg으로 나타났다. 하지만 군용건물들을 고려하지 않고 인근부락의 오래된 건물들을 기준으로 할 때는 최대 2100kg의 폭약을 사용할 수 있는 것으로 나타났다.

핵심어 인공지진, 지반진동, 시추공 발파, 허용수준

1. 서 론

지진 발생 시 진앙 추적에 필요한 지각구조 특성의 규명이나 광역적인 지역에서 발파로 인한 지반진동의

전파특성을 파악하기 위하여 지하 심부에서 다량의 폭약을 폭발시킴으로써 인공적인 지진파동을 발생시키는 실험을 수행하였다. 인공지진은 대구경의 시추공을 천공하고 일정 심도에서 다량의 폭약을 폭발시킴으로써 구현할 수 있다. 다만, 프로그램에서 요구하는 최소한의 폭발규모는 2톤 이상의 폭약을 동시에 발파하는 것인데, 국내의 발파여건상 이런 정도의 대규모 발파는 필연적으로 직, 간접적인 발파공해 문제를 초래하게 된다. 따라서 본 연구에서는 주변 구조물에 지반진동이나 소음 영향을 미치지 않는 한도 내에

¹⁾ 한국지질자원연구원

²⁾ (주)한화

³⁾ High ENC 기술사 사무소

* 교신저자 : bhchoi@kigam.re.kr

접수일 : 2009년 12월 8일

심사 완료일 : 2009년 12월 20일

게재 승인일 : 2009년 12월 23일

서 사용할 수 있는 최대 지발당 장약량을 결정하기 위해서 발파대상 부지에서 시험발파를 실시하고 지반진동의 전파특성을 평가하였다.

2. 사전영향평가

시험발파는 경기도에 위치하고 있는 D 시험장에서 수행되었다. 대상 현장에서는 시험발파 예상지점으로부터 각각 북동쪽과 북서쪽으로 약 3km 떨어진 지점에 2개의 마을이 위치하고 있는데, 이 마을의 가옥들은 대부분 1~2층으로 비교적 오래된 구옥들로서 발파에 의한 지반진동을 받으면 균열의 발생이나 전개로 인하여 민원 발생이 우려되는 상황이다. 또한, 발파장소에서 약 1,700m 정도 떨어진 곳에서는 인근부대의 건물들이 위치하고 있어 이들에 대한 안전성도 고려하여야 한다.

일반적으로 지하 20m 이상의 심도에서 실시되는 시추공 발파는 벤치발파에 비해 폭풍압으로 인한 민원 발생 가능성은 상대적으로 작다고 볼 수 있다. 하지만 시추공 발파는 무자유면 내지 1자유면 발파이므로 폭약의 폭발에너지가 암반의 파쇄보다는 지반진동으로 대부분 전달됨에 따라 지반진동은 벤치발파보다 훨씬 클 것으로 예상되며, 따라서 지반진동으로 인한 민원 발생가능성도 상대적으로 높다고 볼 수 있다.

인공지진의 발생을 위한 본발파의 규모를 폭약 2톤 이상의 동시발파로 산정하였을 때 본발파에 앞서 수행되는 시험발파의 규모를 본발파의 1/5~1/10 정도로만 가정해도 200~400kg 정도의 규모가 된다. 따라서 주변 구조물에 대한 안전성 확보의 측면에서 시험발

파 자체에 대하여도 사전 진동영향평가가 요구된다. 이를 위하여 폭약 수십 kg 정도를 사용하는 시험발파를 수행할 수도 있으나, 본 연구에서는 다음 식 (1) 및 (2)의 국내의 다양한 도로건설 현장으로부터 획득된 노천발파 자료처리 결과의 진동추정식을 활용하였고 (건설교통부, 2006), 이를 통해 주변 보안물건에 대한 안정성을 확보하고자 하였다.

$$PPV_{95\%} (\text{mm/s}) = 2320 \left(\frac{D}{W^{1/2}} \right)^{-1.50} \quad (1)$$

$$PPV_{50\%} (\text{mm/s}) = 699 \left(\frac{D}{W^{1/2}} \right)^{-1.50} \quad (2)$$

위 식을 이용하여 지발당 장약량에 따른 거리별로 예상되는 지반진동 수준을 다음 표 1과 같이 나타낼 수 있다. 보안물건에 대한 지반진동 허용기준을 2~3mm/s로 간주할 때 표 1을 참고하면, 폭원으로부터 약 3km 떨어진 마을에서 장약량 1000kg일 경우 예상되는 지반진동 수준은 약 2.5mm/s로 예상되고, 장약량 400kg일 경우 약 1700m 정도 떨어진 군부대 시설물에서의 예상되는 지반진동 수준은 약 3.0mm/s로 예상된다. 따라서 본 시험발파에서의 최대 지발당 장약량을 400kg로 산정하였다.

3. 시험발파

본 시험발파에서는 가급적 집중장약(concentrated charge)으로 하여 점폭원(point source)을 형성시키는 것이 진동발생에 유리할 것으로 판단되었다. 따라서 발파공

표 1. 지발당 장약량에 따른 거리별 지반진동 예상수준(국내 도로건설현장 노천발파 결과)

장약량(kg) 신뢰수준	300		400		500		700		1,000	
	50%	95%	50%	95%	50%	95%	50%	95%	50%	95%
거리(m)										
300	9.7	32.2	12.0	39.9	14.2	47.2	18.3	60.8	23.9	79.4
600	3.4	11.4	4.3	14.1	5.0	16.7	6.5	21.5	8.5	28.1
900	1.9	6.2	2.3	7.7	2.7	9.1	3.5	11.7	4.6	15.3
1,300	1.1	3.6	1.3	4.4	1.6	5.2	2.0	6.7	2.7	8.8
1,700	0.7	2.4	0.9	3.0	1.1	3.5	1.4	4.5	1.8	5.9
2,100	0.5	1.7	0.6	2.2	0.8	2.5	1.0	3.3	1.3	4.3
2,500	0.4	1.3	0.5	1.7	0.6	2.0	0.8	2.5	1.0	3.3
3,000	0.3	1.0	0.4	1.3	0.4	1.5	0.6	1.9	0.8	2.5

의 직경은 가급적 크게 하여 356mm(14in.)로 하였고, 천공장은 70m로 하였다. 사용된 화약류는 다음 표 2와 같이 고성능 다이너마이트이며(장약장 8m), 방수

및 결선의 용이성을 위해 강철과 PVC pipe로 된 성형 장약통을 사용하였다(그림 1). 또한, 공발현상을 방지하기 위해 직경 13mm의 골재를 사용하여 62m 높이로 전색을 하였다(그림 2). 그림 3은 본 시험발파의 천공 및 장약 등의 발파패턴에 대한 모식도이다.

표 2. 사용 화약류

폭 약	고성능 다이너마이트 (Φ50 mm × 400 mm × 1.0 kg/pcs) 400 kg
뇌 관	순발 전기뇌관 7개
화공품	도폭선(10 g/m, 5.0±0.2 mm) : 8 m × 2열

보안물건(군부대 시설물 5개)을 포함하여 총 20개 지점에서 Instantel 사의 BlasteMate series 와 PMT 사의 eXAD-8 을 이용하여 지반진동 및 소음을 측정하였으며, GPS를 이용하여 측정위치를 측정하여 폭



그림 1. 철제 및 PVC 성형장약통

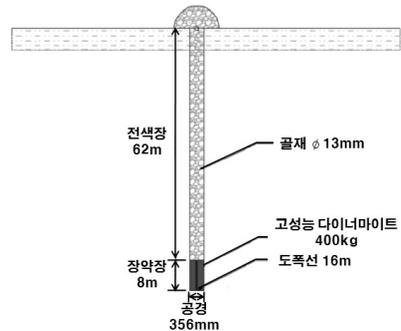


그림 2. 전색물

그림 3. 천공 및 장약 패턴도



그림 4. 계측기 설치



그림 5. 발파 후 모습

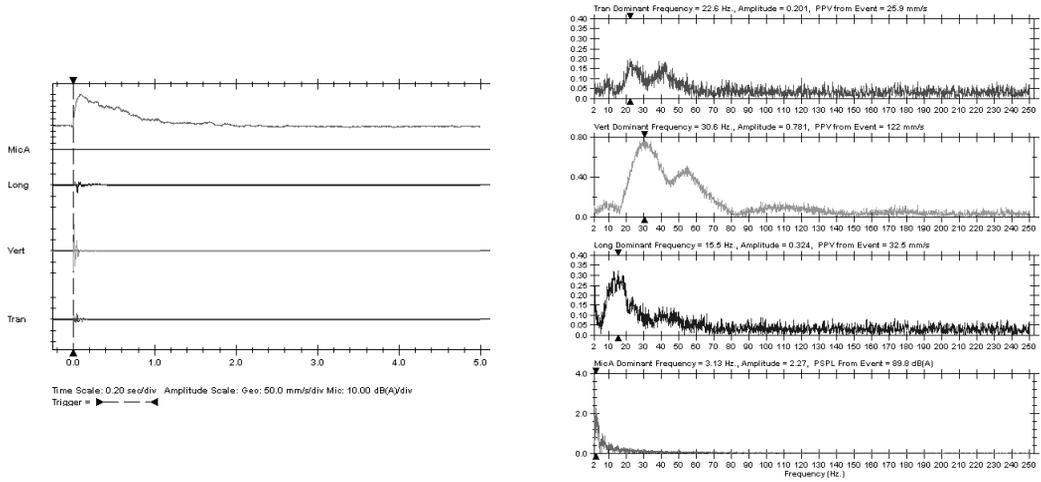
원으로부터의 거리를 산정하였다(그림 4). 그림 5는 발파 시추공의 위치를 나타낸 그림으로 발파 전 시추공 위로 쌓아 놓은 전색물이 발파 후에도 변함없이 그대로 위치하고 있음을 보여주고 있으며, 공발현상과

누두공도 전혀 발생하지 않았다. 계측결과를 정리하면 표 3과 같다.

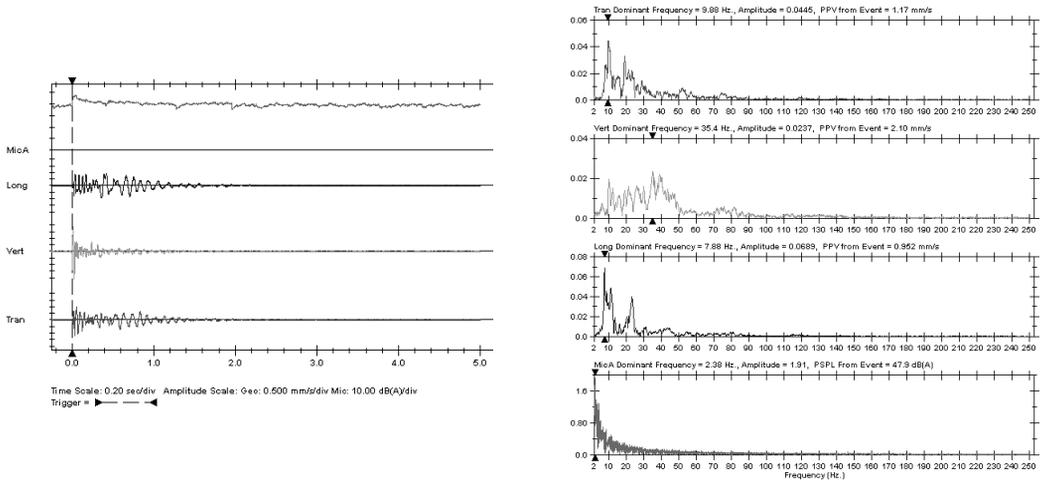
표 3에서 보이는 바와 같이 대부분 수직방향 성분의 지반진동 속도가 가장 크게 나타났으며, 특히 폭원 근처의 경우 다른 두 성분에 비해 매우 크게 나타났다. 그림 6은 계측된 자료 중 일부의 지반진동 파형을 나타낸 것이다. 발파공 주변(약 100m)에서 계측(측점 1)된 지반진동은 지속시간이 0.2 초로 비교적 짧은 반면, 공 주변에서 1km 이상 멀리 떨어진 곳에서 계측(측점 15)된 지반진동은 1 초 이상 지속되었다. 또한 본 시험발파의 진동 주파수 특성을 분석하기 위해 FFT 분석을 통하여 주 진동수를 산정하였는데 대부분 40Hz 이하로 나타났다. 이는 건설발파에서 일반적으로 나타나는 50~100Hz 의 주진동수(Dowding, 1985) 보다 비교적 저주파라고 할 수 있다.

표 3. 지반진동 및 소음 측정자료

측점	S/N	거리 (m)	지반진동 속도(mm/s)				소음 (dB)
			PPV			PVS	
			Tran	Vert	Long		
1	3124	99.4	25.9	122.0	32.5	122	89.8A
2	2326	132.4	18.8	72.1	27.9	72.2	81.2A
3	3667	220.8	17.9	42.7	34.7	48	91.6A
4	3264	297.6	14.0	35.1	17.1	35.7	77.0A
5	3668	391.3	6.73	14.7	14.2	18.4	75.2A
6	5457	442.6	2.94	20.5	6.33	20.6	73.7A
7	2967	479.2	5.00	10.8	6.34	11.1	78.9A
8	5283	541.9	4.19	9.65	3.56	9.87	-
9	2833	574.7	2.46	5.86	5.20	6.74	77.9A
10	2877	665.9	2.07	6.93	2.39	7.35	53.3A
11	10493	684.7	8.18	6.29	9.03	12.4	67.7A
12	7568	786.9	2.14	3.60	1.83	4.06	60.5A
13	10490	878.1	2.60	4.05	2.10	4.09	62.5A
14	11985	1057.9	2.30	3.38	2.78	3.39	-
15	5150	1236.5	1.17	2.10	0.95	2.11	47.9A
16	2813	1497.0	1.66	1.73	1.17	1.99	55.8A
17	2797	1858.0	0.81	1.03	0.63	1.42	54.2A
18	2816	1964.0	0.63	0.71	0.49	0.83	53.3A
19	2812	2208.0	0.49	0.73	0.32	0.73	55.1A
20	2817	2485.0	0.34	0.54	0.39	0.55	53.3A



(a) 측정 1



(b) 측정 15

그림 6. 발파진동 파형 및 주파수 분석 예

4. 자료처리 및 분석

표 3의 계측된 세 방향의 PPV 중 가장 큰 값을 이용하여 자료를 처리하였다. 측정자료의 수가 20개로서 30개 미만이므로 진동수준의 모집단은 t-분포를 따르는 것으로 가정하였다. 먼저 그림 7은 PPV 성분을 대상으로 SRSD(square root scaled distance)로 처리한 그래프이며, 도출된 지반진동 추정식들은 식 (3) 및 식 (4)와 같다. 식 (3)은 측정된 자료의 95%를 아래로 포함하는 식이며, 식 (4)는 지반진동의 PPV 성분들의 중위수준(50%)을 나타내는 식이다. 마찬가지로

로 CRSD(cube root scaled distance)로 처리한 결과를 그림 8과 식 (5) 및 (6)에 보였다.

$$PPV_{95\%} \text{ (mm/s)} = 3875.0 \left(\frac{D}{W^{1/2}} \right)^{-1.714} \quad (3)$$

$$PPV_{50\%} \text{ (mm/s)} = 2526.0 \left(\frac{D}{W^{1/2}} \right)^{-1.714} \quad (4)$$

$$r^2 = 0.98$$

$$PPV_{95\%} \text{ (mm/s)} = 21465.0 \left(\frac{D}{W^{1/3}} \right)^{-1.714} \quad (5)$$

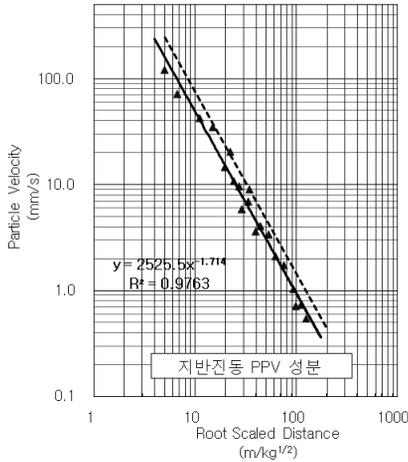


그림 7. SRSD 모형

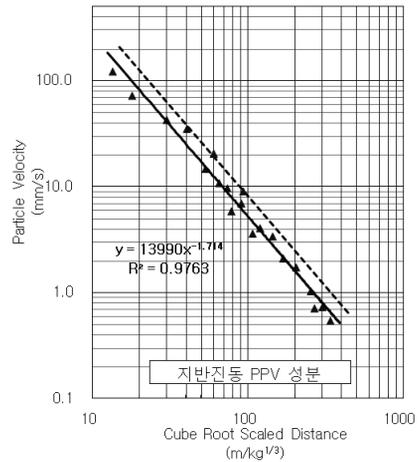


그림 8. CRSD 모형

$$PPV_{50\%} \text{ (mm/s)} = 13990.0 \left(\frac{D}{W^{1/3}} \right)^{-1.714} \quad (6)$$

$$r^2 = 0.98$$

본 시험발파에서의 95% 신뢰수준 지반진동 예측식 (3)의 입지상수는 3875.0 이며 감쇄지수는 -1.724 로 나타났다. 이는 국내 도로건설 현장의 노천발파 자료 처리 결과 식 (1) 의 입지상수 2320.0 과 감쇄지수 -1.50 에 비해 크게 나타나 시추공발파는 일반적인 노천발파보다 진동은 크게 발생하고 감쇄가 빨리 일어난다는 것을 확인할 수 있었으며, 이는 기존의 연구

임성식과 양형식(2003)의 결과와 부합한다고 할 수 있다.

회귀분석 결과 도출된 자승근 및 삼승근 환산거리 모형에 따른 예측식의 적합도는 둘 다 0.98로서 동일하게 나타났다. 따라서 본 연구에서는 원거리에서 더 엄격한 진동수준을 예측하는 자승근 환산거리식을 대상현장에서의 지반진동 수준 추정식으로 채택하였다. 채택된 추정식 (3)을 이용하여 몇 가지 장약량(1000 ~ 5000kg)에 대하여 거리에 따른 지반진동 예상수준(자승근 환산거리)을 계산하여 표 4에 실었다. 표 5는

표 4. 본 현장의 장약량에 따른 거리별 지반진동 예상수준(자승근 환산거리)

(단위 : mm/s)

장약량(kg) 신뢰수준 거리(m)	1,000		1,500		2,000		2,500		3,000		4,000		5,000	
	50%	95%	50%	95%	50%	95%	50%	95%	50%	95%	50%	95%	50%	95%
1,000	6.8	10.4	9.6	14.7	12.3	18.8	14.9	22.8	17.4	26.7	22.3	34.1	26.9	41.3
1,500	3.4	5.2	4.8	7.4	6.1	9.4	7.4	11.4	8.7	13.3	11.1	17.0	13.4	20.6
2,000	2.1	3.2	2.9	4.5	3.7	5.7	4.5	7.0	5.3	8.1	6.8	10.4	8.2	12.6
2,500	1.4	2.2	2.0	3.1	2.6	3.9	3.1	4.7	3.6	5.5	4.6	7.1	5.6	8.6
2,700	1.2	1.9	1.7	2.7	2.2	3.4	2.7	4.2	3.2	4.9	4.1	6.2	4.9	7.5
3,000	1.0	1.6	1.5	2.2	1.9	2.9	2.3	3.5	2.6	4.1	3.4	5.2	4.1	6.3
3,500	0.8	1.2	1.1	1.7	1.4	2.2	1.7	2.7	2.0	3.1	2.6	4.0	3.1	4.8
4,000	0.6	1.0	0.9	1.4	1.1	1.8	1.4	2.1	1.6	2.5	2.1	3.2	2.5	3.8
4,500	0.5	0.8	0.7	1.1	0.9	1.4	1.1	1.7	1.3	2.0	1.7	2.6	2.0	3.1
5,000	0.4	0.7	0.6	0.9	0.8	1.2	0.9	1.4	1.1	1.7	1.4	2.2	1.7	2.6
6,000	0.3	0.5	0.4	0.7	0.6	0.9	0.7	1.1	0.8	1.2	1.0	1.6	1.2	1.9
7,000	0.2	0.4	0.3	0.5	0.4	0.7	0.5	0.8	0.6	0.9	0.8	1.2	1.0	1.5

표 5. 본 현장의 허용 지발당 장약량(자승근 환산거리)

(단위 : kg)

거리(m)	2.0mm/s		3.0mm/s		5.0mm/s	
	50%	95%	50%	95%	50%	95%
1,000	240	146	386	234	701	425
1,700	695	422	1,115	677	2,025	1,229
2,000	962	584	1,544	937	2,802	1,701
2,500	1,503	912	2,412	1,464	4,378	2,657
2,700	1,753	1,064	2,814	1,708	5,107	3,100
3,000	2,164	1,314	3,474	2,108	6,305	3,827
3,500	2,946	1,788	4,728	2,870	8,582	5,209
4,000	3,848	2,335	6,176	3,748	11,209	6,803
4,500	4,870	2,956	7,816	4,744	14,186	8,610
5,000	6,012	3,649	9,650	5,857	17,514	10,630
6,000	8,658	5,255	13,895	8,434	25,219	15,307
7,000	11,784	7,152	18,913	11,479	34,327	20,834

지반진동의 허용치를 2.0, 3.0 및 5.0mm/s로 각기 설정했을 때 허용가능한 지발당 장약량을 거리별로 표시한 결과이다. 일례로, 지반진동의 허용치를 3.0mm/s로 설정했을 때 인근마을(이격거리 3000m)을 기준시 허용장약량은 약 2108kg이며, 군부대 시설물(이격거리 1700m)의 경우 677kg으로 나타났다. 지반진동 허용치 3.0mm/s는 엄격하기로 유명한 개정된 독일기준(DIN 4150, 1986)에서 문화재급의 매우 예민한 구조물에 대한 기준에 해당한다. 따라서 이런 정도로 낮은 허용수준을 적용한다면 대상지역에서 인공지진을 발생시키기 위한 시추공 발파과정에서 별다른 발파공해 문제는 발생하지 않을 것으로 예상된다.

5. 결론

인공지진 발생을 위한 발파의 적정 장약량을 결정하기 위하여 대규모의 시추공을 천공하고 시험발파를 수행하였다. 시험발파 장약량은 기존의 국내 노천발파 결과로부터 얻은 지반진동 예측식을 활용하여 주변 구조물에 영향을 미치지 않는 선에서 400kg으로 결정하였다. 시험발파 결과로부터 대상지역에 대한 지반진동 예측식을 유도하였다. 유도된 예측식을 토대로 발파장소 부근의 군부대 시설물(이격거리 1700m)에 대한 지반진동 허용기준을 3mm/s로 설정하면 최대 사

용가능한 장약량은 약 677kg이 된다. 하지만 이와 같이 낮은 허용수준은 지나치게 엄격한 기준이므로 민원 가능성 등의 주변 여건을 감안하여 인근마을의 가옥(이격거리 3000m)에 대한 지반진동 허용기준을 3mm/s 설정하면 사용가능한 장약량은 약 2100kg이 된다. 이 결과는 대상 지역에서 인공지진 발생을 위한 시추공 발파에 사용할 수 있는 최대 장약량이 2100kg이라는 의미가 되지만 사실 여기에는 높은 안전율이 포함되어 있으므로 전문가의 판단에 따라 더 많은 장약량을 사용할 수도 있다.

감사의 글

본 연구는 국토해양부 첨단도시개발사업의 연구비 지원에 의해 수행되었습니다.

참고문헌

1. 건설교통부, 2006, 암발파 설계 지침 연구 최종보고서.
2. 임성식, 양형식, 2003, 시추공 발파 자료의 터널설계 적용성에 관한 연구, 화약발파, Vol. 20, No. 3, pp. 15-19.
3. DIN 4150 Teil 3, 1986, Erch terungen im Bauwesen -Einwirkungen auf bauliche Anlagen.
4. Dowding, C.H., 1985, Blasting Vibration monitoring and control, Prentice Hall, Englewood Cliffs, pp. 78-82.



정 주 환

한국지질자원연구원 지구환경연구본부

Tel : 042)868-3249
E-mail : coswin33@nate.com



최 병 희

한국지질자원연구원 지구환경연구본부

Tel : 042)868-3237
E-mail : bhchoi@kigam.re.kr



류 창 하

한국지질자원연구원 지구환경연구본부

Tel : 042)868-3236
E-mail : cryu@kigam.re.kr



민 형 동

(주)한화 발파기술팀 팀장

Tel : 02)729-1713
E-mail : hyung777@hanwha.co.kr



최 형 빈

High ENC 기술사사무소

Tel : 02)2057-1891
E-mail : pebin@hanmail.net