

## 암반 굴착공사장의 공법 선택 및 시공사례분석 연구

한동훈 · 장시경<sup>1)</sup>

---

### 초 록

일반적으로 현장에서의 발파공법의 적용은 보안물건과 발파지점의 거리로 구분하여 설계한 종례의 방법에서 탈피하여 건설교통부에서 보안시설건물의 거리~지발당장약량을 기초로 한 6가지의 타입으로 표준화한 방법을 제시하였다.

이는 시험발파를 통하여 발파공해 허용 기준치를 확보하고 회귀분석을 통한 발파영향을 분석한 후 이격거리별 발파패턴 및 발파공법을 선정 및 설계를 기본으로 하는 것이며 이번 00대학교 민석도서관 건립공사에서 적용하여 타당성을 검토하여 실제 설계 시 적용을 하였으며 6가지 타입의 기초적인 모델링을 기본으로 하여 시공설계 및 계측결과를 분석하였다.

핵심어 : 6가지 타입, 거리~지발당장약량, 회귀분석, 시공설계

---

### 1. 서론

건설공사장에서 수행되어지는 발파작업은 발파의 영향으로 진동·소음·비산 등의 공해가 불가피하게 수반되고 있으며, 이에 민원의 발생이 야기되고 있다. 따라서 이러한 진동·소음·비산 등의 공해를 저감시킬 수 있는 적용 공법의 기준이 명확하지 않고 설계자들 역시 그 기준이 각각 다르다. 따라서 건설교통부에서 6가지 타입의 발파패턴을 제안하였으며, 이를 기준으로 적정 발파공법을 적용하여 효율적인 발파 설계 및 민원발생을 최소화하자는 의미이다.

이에 부산 00대학교 민석도서관 건립공사에 이 방법을 적용한 설계를 하였으며, 주변 보안물건 및 안전성에 기초하여 시험발파 후 설계를 하였다.

---

1) 동서대학교 건설공학부

## 2. 암반굴착공사 시공사례

### 2.1 공사개요 및 지침

#### 1) 공사개요

- ① 공사명 : 민석도서관
- ② 공사위치 : 부산시 사상구 주례2동 산69-1번지 일원 13필지(도시계획사업)
- ③ 건축공사 : 지하 1층, 지상 5층 / 연면적 : 12,495㎡(3,779평)
- ④ 토목공사(부지조성) : 8,750㎡(2,646평)
- ⑤ 굴착토량 : 81,992㎡(암토량 : 56,180㎡, 암반 : 25,812㎡)

#### 2) 지형 및 지질

- ① 조사지역은 부산시 사상구 주례2동 동서대학교 내 도서관 신축예정 부지로서 동서 방향으로 분포하는 승학산, 엄광산, 수정산 산체의 북쪽 사면에 해당하며, 동서대학교 후문 진입도로에 접한 산체를 절취하여 도서관 부지를 조성할 계획이다.
- ② 조사지역의 광역지질은 중생대 백악기 경상누층군 중 유천층군에 해당하는 안산암질 암류를 기저로 하여 후기에 이를 관입한 불국사 관입암체에 속하는 흑운모화강암이 분포하며, 최후기에 제4기 층적층이 제 암석을 부정합으로 피복하여 저지에 분포한다.
- ③ 본 조사지역은 불국사 관입암체인 흑운모화강암의 분포지내에 위치한다.
- ④ 현장 지표지질 조사결과 대상부지 좌측부의 계곡부에는 풍화가 다소 진행된 흑운모화강암의 노두가 일부 노출되며, 표토부에는 화강암 및 안산암질암의 전석들이 토사에 혼입되어 자갈·점토층의 토성으로 분포한다.

### 2.2 암반굴착공법과 종류별 특성

#### 1) 건교부 지침

건설교통부에서 제안한 “시험발파 및 암발파설계 잠정지침(안)”에 의한 암굴착공법은 6가지의 Type으로서 표1과 같다.

표1. 건설교통부 제안 발파공법의 지침(안)

구분	공법 Type	천공직경	천공 길이	특 정
특수	Type I	51m/m 이내	1.5m	· 미진동파쇄기 사용하고

발파	(암파쇄굴착발파)			대형 브레이커로 2차 파쇄 시행
제한 발파	Type II (정밀진동발파)	51m/m 이내	2.0m	· 소량의 폭약으로 균열 발생 시킨 후 대형 브레이커로 2차 파쇄 시행 · 에멀전 계열 폭약
	Type III, IV (진동제어발파)	51~76m/m	2.7~3.2m	· 발파 영향권 내에 보안 건물이 있을 시 적용 · 시험 발파 후 규제기준 제시 · 에멀전 계열 폭약
	Type V (일반발파)	76m/m	5.7m	· 발파영향권 내에 보안 건물이 이격 될 시 적용 · 에멀전 계열 폭약
무제한 발파	Type VI (대규모발파)	76m/m 이상	11.5m	· 발파 영향권 내에 보안 건물이 존재하지 않을시 적용 · 초유 폭약

2) RAL 지침

대한화약발파공학회 “화약·발파” 학회지에서 인용한 발파공법의 지침은 표2와 같다.

표2. 대한화약발파공학회 제안 발파공법의 지침

구 분		보안건물 이격거리	천공직경	천공길이	공 법
미진동 파쇄공법	미진동파쇄	30m	45mm 이하	0.6~2m	· 팽창성파쇄제를 이용하여 암 파쇄하고 기계굴착을 병행함 · CCR을 사용한 발파 50% 와 브레이커파쇄 50% (장약량 0.06~0.25kg)
	미진동발파	10~50m			
진동 제어발파	정밀진동 제어발파	30~50m	45~76mm	0.9~6m	· 0.2~10. cm/sec · 천공경 32~51mm · 장약량 0.125~5kg
	일반진동	50~80m			

한동훈, 장시경

	제어발파				<ul style="list-style-type: none"> <li>· 보안건물과의 거리 : 20~200m</li> <li>· 에멀전계폭약</li> </ul>
	보통진동 제어발파	80~300m			
일반 발파공법	인력식발파	200~300m	76mm 이상	6~15m	<ul style="list-style-type: none"> <li>· 0.5cm/sec</li> <li>· 천공경 76mm 이상</li> <li>· 장약량 4~16kg</li> <li>· 보안건물과의 거리 : 200m</li> <li>· 초유폭약</li> </ul>
	일반발파	200~300m			
	대규모발파	300m 이상			

2.3 공법 적용시 안정성 검토 사항

1) 인접한 앙카식 옹벽의 안정성 검토

① 앙카식 옹벽의 개요

앙카식(H-PILE)옹벽 공사는 엄지말뚝, 토류판, 영구앙카로 지지되는 옹벽으로서 주로 높은 흩꺼기 부위의 절취 및 터파기 부위에 일반옹벽으로는 시공 불가능한 경우 시공한다

② 앙카식 옹벽의 안정성 검토요령

기초시험 터파기 완료 후 육안으로 판단하여 토목설계기준을 이용하여 Rankine의 토압식으로 옹벽의 안정성 검토를 한다.

▷ 활동에 대한 안전성

$$F_s = P_v \times f / P_h > 1.5$$

(여기서, f : 마찰계수, P<sub>v</sub>, P<sub>h</sub> : 수직, 수평성분 힘)

▷ 전도에 대한 안정성

$$F_s = M_R / M_O > 2.0$$

▷ 지반 침하에 대한 안정성

: 필요시 평판재하시험, 표준관입시험 등을 실시하여 지지력 확인

③ 공동주택과 옹벽의 최소 이격거리

발파현장 주변의 공동주택과 옹벽의 최소 이격거리는 표3과 같다.

표3.공동주택과 옹벽의 이격거리

옹벽기초 위치	공동주택(4층 이상)	연립주택(3층 이하)
옹벽기초가 구조물기초 이하에 있는 경우	당해 옹벽높이만큼 이격	해당 옹벽 높이만큼 이격
구조물기초가 옹벽기초 이하에 있는 경우	옹벽높이가 5m이하 일때 - 옹벽높이만큼 이격 옹벽높이가 5m 이상 일때 - 5m이격	옹벽높이가 3m이하 일때 - 옹벽높이만큼 이격 옹벽높이가 3m이상 일때 - 3m 이격

④ 굴착공사 시 유의사항 및 적용진동 안전기준

굴착공사는 지질에 따라 1회 천공장, 폭, 심도 및 비탈경사에 유의하여 주변 지반을 가능한 이완시키지 않도록 한다. 이때 작업장내의 배수를 고려해야 하고, 특히 사면의 붕괴 또는 토류벽의 유지에 유의하여 시공한다. 지하굴착공사에는 예상하지 못한 사고가 빈번하므로 현장책임자는 항시 공사장 내·외를 순시하여 가시설물의 엄지말뚝, 띠장, Anchor, 주변지반의 침하등에 대하여 면밀히 관찰하고 만약 이상이 발견될 경우는 그 보강대책을 수립해야 한다.

본 공사는 사저에 인근구조물의 변위를 예측할 수 있는 각종 계측기(침하계, 경사계, 균열계)를 부착하여 측정해야 하며, 가시설물에도 계측기(지중수평변위, 지하수위, 로드셀)을 부착하여 현장계측을 필히 실시해야 하고 현장계측은 계측결과를 정확히 분석하고 보강대책을 수립할 수 있도록 해야 한다. 이때 발파로 인한 진동안전기준은 콘크리트 구조물의 허용기준치 1.0~4.0cm/sec를 적용한다.

2.4 시공사례

1) 현장 암굴착 조건

- ① 설계상 조건 : 브레이커 굴착공법
- ② 허가상 조건 : 무진동 파쇄공법
- ③ 현장적용공법 : 진동제어발파

(장약량 ~0.2kg/공, 천공장 3m, 천공경 75mm, 진동속도 0.2~0.3cm/sec)

한동훈, 장시경

2) 암굴착공법 변경 Flow Chart

- ① 암굴착에 따른 허가조건 확인(부산시청)
- ② 현장상황(공기, 공사비, 민원) 고려 공법 변경 검토
- ③ 도시계획시설사업 실시계획변인가조건 변경 요청(사상구청)  
⇒암굴착공법검토서 첨부
- ④ 허가조건 변경 승인 회신 받음(부산시청)
- ⑤ 현장 시공에 적용

3) 발파 계측치

① 시험 발파 시 계측 자료

가. 시험발파 계측위치도

본 시험발파의 계측 위치는 발파장소(폭원)으로 부터 가장 근접된 보호대상 구조물과 현장 내에서 실시하였다. 발파원으로 부터의 이격거리는 민석스포츠센터 155m지점, 대학본관 142m지점, 주례여고 124m지점에서 계측되었다.

나. 측정내용

각 위치별 계측결과는 표4와 같다.

표4. 거리별 제원별 진동측정치

발파 횟수	위치	거리 (m)	진동치 PVS (cm/sec)	주파수 (Hz)	소음치 (dB(A)) 음압치 (dB(L))	천공장 (m)	저항선 공간격 (m)	지발딩 장약량 (kg)	천공수 (공)	총 장약량 (kg)
1회	주례여고	124	0.051cm/sec 이하의 미진			2.7	1.0~1.2	1.0	3	3.0
	대학본관	142	0.051cm/sec 이하의 미진							
	민석스포츠센터	155	0.013cm/sec 이하의 미진							
2회	주례여고	124	0.051cm/sec 이하의 미진			2.7	1.0~1.2	1.0	5	5.0
	대학본관	142	0.051cm/sec 이하의 미진							
	민석스포츠센터	155	0.013cm/sec 이하의 미진							
3회	주례여고	124	0.08	38~49	93.3dB(L)	2.7	1.0~1.2	1.0	7	7.0
	대학본관	142	0.051cm/sec 이하의 미진							

	민석스포츠헤타	155	0.013cm/sec 이하의 미진							
4회	주례여고	124	0.08	7.5~23.3	95.8dB(L)	3.2	1.4~1.6	2.0	3	6.0
	대학본관	142	0.0752	30.1~73.1	57.2dB(A)					
	민석스포츠헤타	155	0.027	22~24	73.0dB(A)					
5회	주례여고	124	0.10	28~63	91.7dB(L)	3.2	1.4~1.6	2.0	5	10.0
	대학본관	142	0.0951	30.1~56.9	56.5dB(A)					
	민석스포츠헤타	155	0.0175	20~30	73.0dB(A)					
6회	주례여고	124	0.08	4~58	93.3dB(L)	3.2	1.4~1.6	2.0	7	14.0
	대학본관	142	0.0562	30.1~85.3	59.3dB(A)					
	민석스포츠헤타	155	0.0175	19~28	72.8dB(A)					
7회	주례여고	124	0.051cm/sec 이하의 미진			2.0	0.8	0.375	3	1.125
	대학본관	142	0.051cm/sec 이하의 미진							
	민석스포츠헤타	155	0.0159							
8회	주례여고	124	0.051cm/sec 이하의 미진			2.0	0.8	0.375	5	1.875
	대학본관	142	0.051cm/sec 이하의 미진							
	민석스포츠헤타	155	0.0206							

다. 진동치 회귀분석결과

시험발파결과 측정된 자료를 회귀분석을 실시하였으며, K는 266.2이었고, n은 -1.84였다.

진동 추정식은 다음과 같다.

$$V = 266.2 \left( \frac{D}{\sqrt{W}} \right)^{-1.84}$$

② 시공 중 계측자료

2005.12.26부터 2006.4.15까지 약 5개월간 발파시공 중 계측한 진동속도는 표5와 같다.

표5. 발파시공 중 계측결과 집계표

일 자	천공장(m)	천공경 (mm)	지발당 장약량 (kg/delay)	측정 위치	발파 횟수	진동속도	비고
05-12-26	2.0 ~ 3.2	75	2	A	8	0.429 ~ 0.984	
05-12-28	2.0 ~ 3.2	75	2	B	11	0.397 ~ 1.970	
06-01-03	2.0 ~ 3.2	75	2	A	9	0.492 ~ 0.730	
06-01-07	2.0 ~ 3.2	75	2	A	15	0.413 ~ 0.968	
06-01-10	2.0 ~ 3.2	75	2	B	15	0.460 ~ 7.160	
06-01-11	2.0 ~ 3.2	75	2	B	8	0.937 ~ 2.560	
06-01-13	2.0 ~ 3.2	75	2	B	9	0.524 ~ 1.060	
06-01-16	2.0 ~ 3.2	75	2	A	10	0.445 ~ 0.873	
06-01-21	2.0 ~ 3.2	75	2	B	10	0.905 ~ 1.370	
06-01-24	2.0 ~ 3.2	75	2	A	8	0.460 ~ 0.921	
06-01-25	2.0 ~ 3.2	75	2	B	8	0.540 ~ 1.620	
06-01-26	2.0 ~ 3.2	75	2	B	8	0.714 ~ 1.600	
06-01-27	2.0 ~ 3.2	75	2	B	8	0.508 ~ 2.480	
06-02-04	2.0 ~ 3.2	75	2	B	7	0.492 ~ 1.780	
06-02-08	2.0 ~ 3.2	75	2	B	22	0.476 ~ 2.250	
06-02-11	2.0 ~ 3.2	75	2	B	10	0.540 ~ 1.920	
06-02-13	2.0 ~ 3.2	75	2	B	15	0.746 ~ 2.49	
06-02-14	2.0 ~ 3.2	75	2	B	7	0.429 ~ 1.750	
06-02-16	2.0 ~ 3.2	75	2	A	9	0.445 ~ 1.810	
06-02-17	2.0 ~ 3.2	75	2	A	8	0.445 ~ 0.873	
06-02-20	2.0 ~ 3.2	75	2	B	8	0.445 ~ 0.683	
06-02-21	2.0 ~ 3.2	75	2	A	10	0.492 ~ 1.940	
06-02-24	2.0 ~ 3.2	75	2	B	12	0.540 ~ 2.700	
06-02-25	2.0 ~ 3.2	75	2	B	12	1.410 ~ 1.670	
06-02-27	2.0 ~ 3.2	75	2	B	5	0.572 ~ 2.520	
06-02-28	2.0 ~ 3.2	75	2	A	13	0.429 ~ 1.700	
06-03-09	2.0 ~ 3.2	75	2	A	12	0.445 ~ 0.857	
06-03-10	2.0 ~ 3.2	75	2	A	12	0.397 ~ 0.683	
06-03-13	2.0 ~ 3.2	75	2	B	8	0.445 ~ 0.651	
06-03-15	2.0 ~ 3.2	75	2	B	11	0.445 ~ 1.430	
06-03-17	2.0 ~ 3.2	75	2	B	7	0.572 ~ 2.650	
06-03-20	2.0 ~ 3.2	75	2	B	6	0.460 ~ 1.840	
06-03-24	2.0 ~ 3.2	75	2	B	16	0.445 ~ 2.380	
06-03-25	2.0 ~ 3.2	75	2	A	12	0.413 ~ 2.730	
06-03-28	2.0 ~ 3.2	75	2	B	14	0.413 ~ 0.826	
06-03-29	2.0 ~ 3.2	75	2	A	10	0.413 ~ 2.700	
06-04-01	2.0 ~ 3.2	75	2	A	8	0.445 ~ 0.810	
06-04-06	2.0 ~ 3.2	75	2	A	20	0.413 ~ 0.857	
06-04-08	2.0 ~ 3.2	75	2	A	8	0.524 ~ 0.873	
06-04-12	2.0 ~ 3.2	75	2	B	9	0.556 ~ 1.980	
06-04-13	2.0 ~ 3.2	75	2	B	10	0.794 ~ 2.140	
06-04-15	2.0 ~ 3.2	75	2	B	6	0.508 ~ 2.440	



2.5 계측결과 분석

1) 진동치 회귀분석결과

발파기간 중 계측한 진동치를 회귀분석한 결과는 그림1과 같으며 교차점분석 결과는 그림2와 같다.

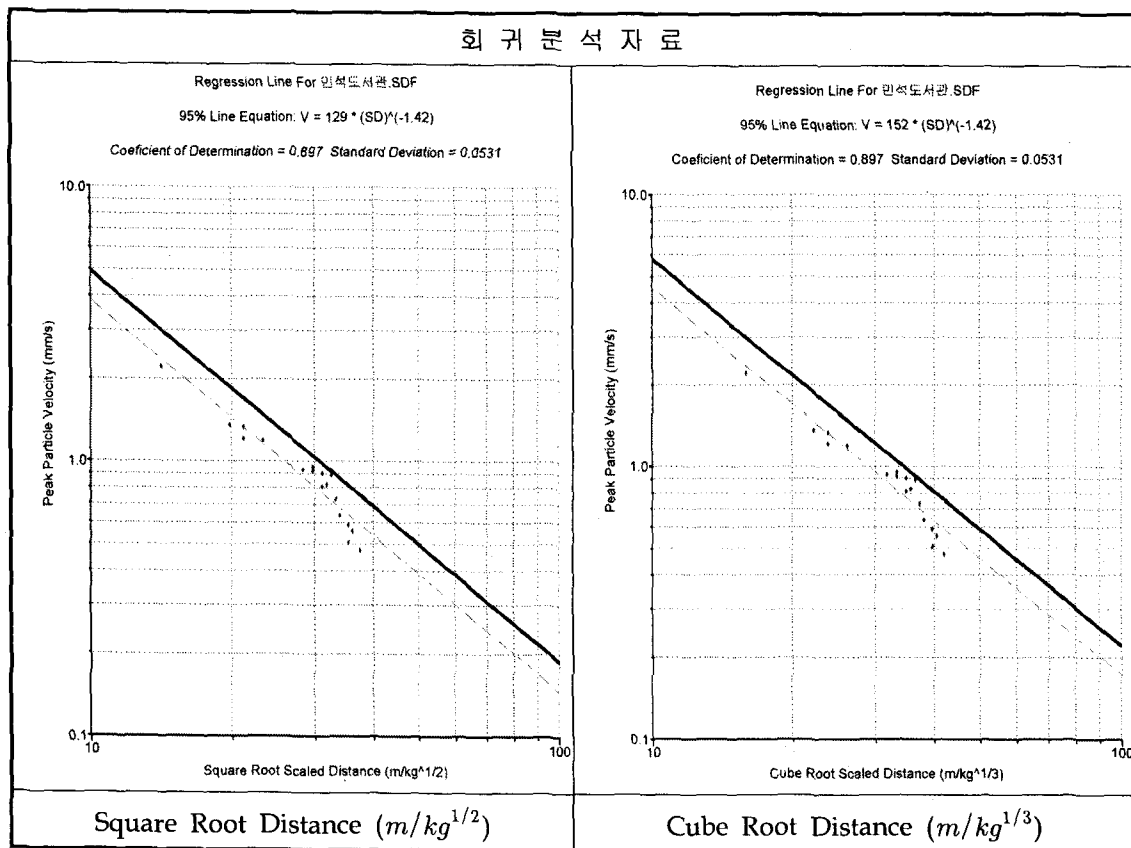


그림1. 발파시공 중 계측자료 분석결과

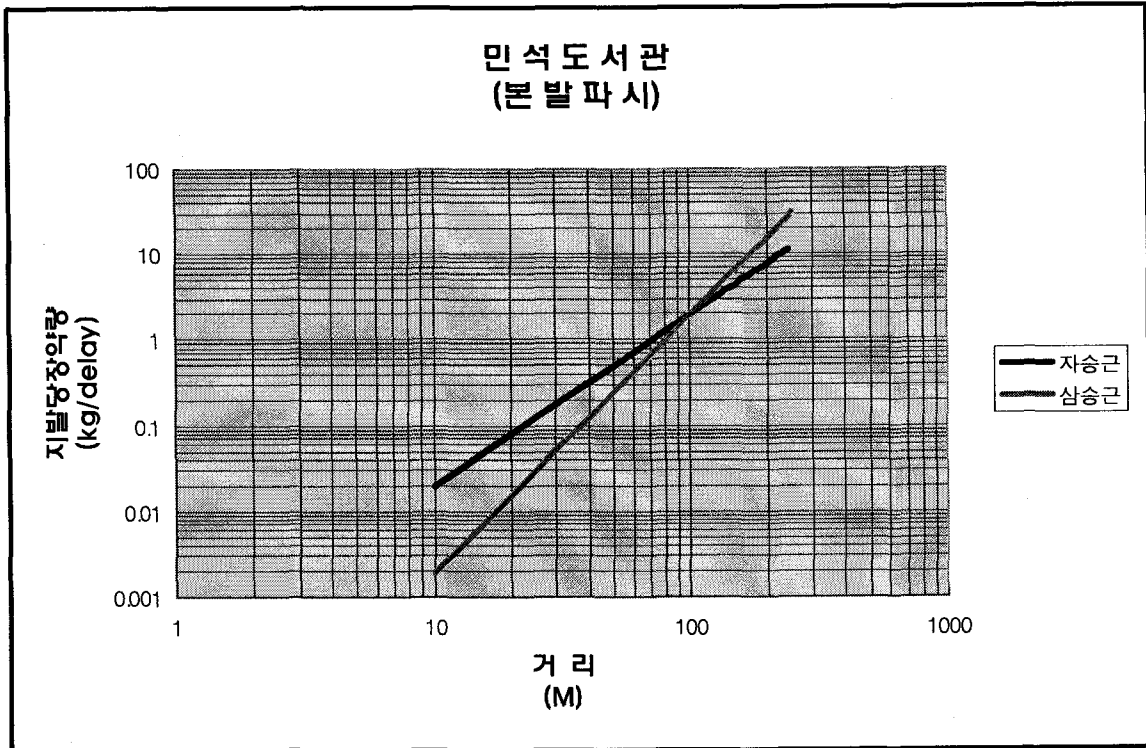


그림2. 발파시공자료 교차점분석결과

2) 분석결과 문제점 검토

발파시공 자료를 분석한 결과 자승근분석에서 K는 129, n는-1.42였으며, 삼승근분석에서는 K는 152, n는 -1.42였다. 이때 교차점분석결과는 105m였다. 본 결과는 미국의 경우 교차점이 6~31m이고, 한국의 경우 30~50m에 비하면 신뢰도가 매우 낮다. 즉 시공 중 자체 계측자료는 보안물건에 거의 고정 측정하므로 수집된 데이터 자체의 신뢰도가 매우 낮고, 이로 인하여 공학적 신뢰도를 보장하기 어려움이 입증 되었다.

2.6 암반굴착 공법 선택시 유의사항

1) 암반 굴착시 유의사항

① 설계시 유의사항

- 보안시설의 허용진동규제기준과 이격거리에 따라 적정 발파공법으로 설계

② 시공 시 유의사항

- 발파원 인근에 보안시설물이 있을 경우 발파공사 시행 전에 시험발파를 통하여 발파 진동 추정식을 구하고 시공성과 경제성을 종합 검토함.

- 노천발파 시 발파 패턴도를 작성하여 현장에서 감리자의 철저한 감리감독이 가능하도록 함

③ 공사관리 시 유의사항(민원측면)

- 암 발파로 발생하는 소음·진동으로 인한 민원 최소화
- 암 천공 시 분진발생 억제(분진 고려한 드릴머신 사용)

2) 공법 변경 시 문제점

① 계획상 문제점

- 지질조사의 한계로 정확한 암분포선 도출 불가
- 분포 암반의 균질성 불량 시 설계상 공법 적용이 현장 상황과 상이함

② 행정 절차상 문제점

- 허가관청의 허가조건 부여 시 경제성 보다 안정성에 우선한 허가조건 부여됨
- 발파 등 전문 세부공법 적용 시 설계자의 해당 분야 전문가의 자문 필요
- 허가관청 담당자의 전문분야 이해력 부족 시 방대한 첨부 자료 필요

③ 시공상 문제점

- 건설사 및 전문하도급 업체의 해당분야 전문지식 결여
- 시공사의 시공 자문용역에 대한 인식 부족

④ 관리상 문제점

- 전문 공정 투입 시 전문 정보 부족
- 시공 후 관리 자료의 Data化 노력 부족

3. 결론

- 1) 00대학교 민석도서관 신축공사 시 설계는 브레이크 굴착공법이었으나 허가관청에서 무진동 파쇄공법으로 허가되었다. 이는 공사비의 증대로 이어져 현장에서 큰 부담을 가지고 있었으나 시험발파 및 굴착공법 검토결과 진동제어발파로 변경함에 따라 공기와 공사비를 대폭 줄일 수 있었다.
- 2) 시험발파 진동측정 자료의 회귀분석결과는  $V=266.2(SD)^{-1.84}$  이었으나 약 5개월간의 발파시공 중 진동측정 자료의 회귀분석결과는  $V=129(SD)^{-1.42}$ 로서 차이가 있었다. 그리고 교차점 분석결과도 약 105m로서 미국 및 한국의 경우에 비하여 매우 큰 차이가 있었다. 즉 시공 중 자체 계측자료로는 공학적인 신뢰도를 보장하기 매우 어려웠다. 그러므로 장기간의 발파공사시에는 반드시 전문가의 도움으로 시공 중 2~3회의 검증 계측·분석·설계 및 공법조정이 이루어져야 할 것이다.

한동훈, 장시경

### 참고문헌

1. 김재극, 1988, 산업화약과 발파공학, 서울대학교 출판부, pp.366
2. 임한욱 외 4인, 한국토지개발공사, 1993, 암발파 설계기법에 관한 연구, pp.353
3. 류창하 외 4인, 대한화약발파공학회, 2002, "미진동발파공법 적용사례에 관한 연구", 화약·발파, Vol.29, NO3, pp40, 41, 44~45, 47
4. 건설교통부 부산지방 국토관리청 교육교재, 2004, "암발파 시공 및 설계요령" pp.19
5. Konya, C.J and E.J.Walter, 1990, Surface Blasting Design, Practice-Hall, Inc, pp256