

암반 절취 공법의 타당성 검토

[서울외곽 16공구 현장 사례를 중심으로]

조 현 / 토목기술부 과장

터 널, 댐, 각종 도로공사 및 지하 공간 등은 물론이고, 간척 사업, 재개발, 각종 부지 조성 등 건설 분야에서 암반을 파쇄하기 위한 폭약류를 활용한 발파 공법은 널리 활용되고 있다.

그러나 최근 발파작업시 발생되는 지반의 진동, 소음, 비석 등 공해 유발로 사용에 제한을 받고 있는 실정이다. 특히 도심지의 경우 밀집된 건물 및 각종 시설, 진동에 민감한 전자부품 및 기계류, 그리고 생활수준 향상에 따른 쾌적한 환경 추구 및 육구 증대 등으로 발파 작업의 시행은 점점 어려워져 심지어 시골이나 산악 지역에서의 발파마저도 일부 지역을 제외하고는 제한을 받기도 한다.

이에 따라 발파 작업을 대신하여 Road Header, Breaker 등 파쇄장비가 개발, 활용되고 있으나 경제성 및 시공 능률면에서 아직까지 발파보다 월등한 대체공법은 별로 없는 것으로 알려지고 있다.

그러나 군부대 및 종교 단체의 인접 또는 집단 민원이 발생된 지역 등 국부적인 특수 지역에서는 민원에 적절히 대처할 수 있는 새로운 암반 굴착 공법이 요구되고 있으며, 이에 대응하여 유압Jack 파쇄 공법

(Hydraulic Rock Splitter) 및 Plasma Blasting 등의 신공법이 실용화되고 있다.

검토 배경 및 목적

서울외곽 순환 고속도로 건설공사(제16공구) 현장은 (이하, 본 현장이라 함) 중점부(STA. 3+200~STA. 3+600)의 발파암 절취와 관련하여 인근(최단거리 : 30m)에 민가 및 축사가 밀집하여 집단 민원의 발생 소지가 많다. 또한 60m부근에

군부대의 탄약고가 위치하고 있어 육군의 폭파장 운용 규정에 탄약 저장소로부터 800m이내에서는 발파를 하지 못하도록 규정하고 있는 바, 발파암 절취를 위한 새로운 공법을 적용하지 않으면 안되는 여건이다. (표1 참조)

절취 대상 암반의 일축 압축강도가 150~200MPa정도로 극경암이고 특히 군부대 탄약고 부근(STA. 3+ 250)의 암반은 절리가 거의 발달되어 있지 않은 상당히 Massive한 상태로 단순 Breaker작업으로

(표 1) 서울 외곽 16공구 현장 주변 지역 현황

구 분	인접 건물	수 량	이격거리	현 황
○○○○ 군부대	탄약고	5개동/35평	60m	<ul style="list-style-type: none"> • 육군 규정 제447조5항에 저축 - 이격거리 800m 유지 - 발파시 탄약고 신축, 이전 요구 - 신축, 이전 시 공사비 7,200만원 추정
동양동	가옥	450세대	40m	<ul style="list-style-type: none"> • 가옥 - 벽돌조 건물로 노후화 및 다수의 균열 기 발생 - 집단 민원 발생 예상 • 한우목장 및 사슴목장 - 소음 및 진동에 의한 원유감산 및 성장지장 관련 민원 예상 - 임시 이전 보상비 2억원 추정
	한우 목장	38두/1개소	70m	
	사슴 목장	20두/1개소	50m	
굴현동	가옥	220세대	250m	<ul style="list-style-type: none"> - 원거리 지역 - 본 현장에 대한 민원소지 적으나, 17공구에 집단민원 제기로 대처 상태 - 본 현장 발파시 집단민원 예상 목장 임시 이전 보상비 1억원 추정
	젓소 목장	30두/1개소	220m	

는 절취가 곤란하여 시공 효율성이 매우 낮을 것이다. 또한 이로 인한 연속적이고 과다한 Breaker작업으로 상당한 소음이 예상되는 바 주변의 민원에 대한 대책이 요구되고 있다.

이와 같이 본 현장의 주변 상황 및 지반 조건 등을 바탕으로 발파 작업 시에 발생하는 발파 진동수준을 예측하여 인접 구조물에 대한 영향 평가 및 안전 시공을 수행하기 위하여, 먼저 발파에 의한 암반 절취의 적용성 여부를 판단한다. 그리고 Breaker 등 기계 굴착시의 예상 소음수준을 추정하여 주변 축사 등에 미치는 영향을 판단, 기계 굴착 가능 지역의 범위 등을 예측한다.

따라서 발생 예상 진동·소음에 따른 제약 이외에, 육군규정에 의한 발파 작업 불가능 및 암반조건에 따른 Breaker 등의 기계 굴착 시공이 불가능한 지역에 대하여 별도의 암반 절취 공법을 비교·검토하여 최적의 경제성 및 시공 효율성을 확보할 수 있는 병행 공법 제안을 목적으로 한다.

현장 발파진동 예상수준

발파진동은 진폭과 주기를 갖는 진동이며, 발파진동의 크기는 암반의 변위, 진동속도, 진동가속도로 표시할 수 있다. 발파진동 표기 단위로 흔히 쓰이고 있는 진동속도(cm/sec)와 진동레벨(dB(V))의 차이점은 진동속도의 경우는 입자운동의 속도를 나타낸 것이며, 진동레벨의 경우는 가속도레벨의 주파수에 의한 인간의 진

동감각을 보정한 것이다.

현재 진동의 크기를 표현할 때는 측정의 용이함과 기존의 측정자료가 대부분 진동속도에 의한 것이므로 진동속도를 기준으로 하는 것이 일반적이나 인체에 미치는 영향을 파악한다는 의미에서는 진동레벨로 표현하는 것이 바람직하다.

발파에서의 지반진동의 크기는 폭원과의 거리, 사용 화약량, 장약량, 전색 상태, 천공패턴 등의 발파조건과 전파경로, 지반의 성질, 성층상황 등 지반조건의 영향에 의하여 변하기 때문에 이러한 모든 인자를 고려한 보편적인 발파 진동값을 나타낼 수는 없다. 따라서, 현장에 적합한 진동수준을 예측하기 위해서는 시험발파를 통해 먼저 거리와 약량만을 달리 하고 그외의 조건을 동일하게 정하고 진동측정을 되풀이 하여 얻어진 결과를 조정하여 나타내는 방법을 생각하여야 한다.

이러한 방법에 의해서 오늘날까지 여러가지 실험식이 제시되었다. 따라서, 본 현장의 진동수준을 예측하기 위해서는 우선 발파하고자 하는 지반조건에 가장 적합한 실험식을 선택하여 발파한 후 발파결과에 의해 얻어진 데이터로 보정하여 현장에 적합한 발파진동식을 산출하여야 임의의 거리에 대한 진동속도를 예측할 수 있다.

그러나, 본 현장의 경우 현장여건에 의해 시험발파를 할 수 없는 상황이므로 기존에 발표된 여러가지 실험식을 이용하여 진동수준을 예측하고자 한다.

1. 발파진동 추정식

1) 허진 박사 등에 의해 제안된 발파진동 추정식¹⁾

$$V = K \cdot \left(\frac{D}{\sqrt[3]{W}} \right)^{-n} \quad (1)$$

여기서,

n : 서울 편마암(1.5)

K : $E_i \cdot (R_i \cdot S_c + Q)$

E_i : 폭약 보정률 (함수폭약=0.8)

R_i : 암종에 따른 발파상수 (서울 편마암=0.0206)

S_c : 암석의 일축압축강도(kg/cm²)

Q : 발파형식에 따른 보정값

서울 편마암(바닥발파 = 60,

계단발파 = 30)

따라서, 식(1)에 의거하여 2자유면 발파를 기준으로 진동추정식을 산출하면 식 (2)와 같다.

$$V = 89.2 \cdot \left(\frac{D}{\sqrt{W}} \right)^{-1.5} \quad (2)$$

$$D = (89.2)^{2/3} \cdot V^{-2/3} \cdot W^{1/3} \quad (3)$$

여기서,

n : 1.5 (서울 편마암)

K : $E_i \cdot (R_i \cdot S_c + Q)$

= $0.8 \times (0.0206 \times 2500 + 60)$

= 89.2

식(2)를 거리 D에 대해 정리하면, 식(3)과 같이 표현된다.

2) 미국 광무국(USBM; United States Bureau of Mine)의 발파진동식²⁾

$$V = 160 \cdot \left(\frac{D}{\sqrt{W}} \right)^{-1.6} \quad (4)$$

$$D = (160)^{1/1.6} \cdot V^{-1/1.6} \cdot W^{1/2} \quad (5)$$

3) 국내의 노천 발파시 회귀분석된 진동식

- 아산만 저장시설²⁾ (1991) :

$$V = 260 \cdot \left(\frac{D}{3\sqrt{W}}\right)^{-1.754}$$

$$D = (260)^{1/1.754} \cdot V^{-1/1.754} \cdot W^{1/3} \quad (6)$$

- LG 강남타워³⁾ (1992) :

$$V = 954.5 \cdot \left(\frac{D}{3\sqrt{W}}\right)^{-2.08}$$

$$D = (954.5)^{1/2.08} \cdot V^{-1/2.08} \cdot W^{1/3} \quad (7)$$

4) 국내 건설진동 규제기준에 의한 진동속도

국내의 건설진동 규제기준은 진동 레벨(dB(V))로 진동을 나타내고 있으므로, 거리에 따른 진동수준을 예측하기 위해서 진동속도의 Peak치와 진동레벨과의 관계식(8)⁴⁾에 의거하여 진동속도로 환산하였다. 국내 건설진동 규제 기준은 1일 4시간 미만의 진동으로 주간에만 발생할 경우 70 dB(V)로 정해져 있으며, 이를 식(8)에 적용하여 진동속도로 환산하면 다음과 같이 계산된다.

$$dB(V) = 20.9\log V + 69.4 \quad (8)$$

여기서, V: mm/sec

$$70 \text{ dB(V)} = 20.9\log V + 69.4$$

$$V = 0.107 \text{ cm/sec}$$

2. 진동속도에 따른 이격거리

1절에서 언급한 여러 발파 추정식 및 진동레벨을 기준으로 환산한 진동속도에 따른 필요 최소 이격거리를 정리하면 다음(표 2)와 같다.

이상과 같은 결과로부터 본 현장에서 발파를 실시하면, 소음진동 규

(표 2) 진동속도에 따른 최소 이격거리

(지발당 장약량 500g 기준)

	70 dB(V)	0.05cm/sec	0.2cm/sec	0.3cm/sec
허진 식	73.55m	116.7m	46.33m	35.36m
USBM 식	71.13m	109.7m	46.12m	35.80m
아산만 저장시설	70.25m	104.3m	47.31m	37.55m
LG 강남타워	65.01m	90.73m	46.59m	38.34m
최소 필요 이격거리	73.55m	116.7m	46.33m	38.34m

제법의 1일 4시간 미만의 주간진동을 기준으로 할 경우 65m ~ 74m, 일본 大阪府의 기준치인 0.05 cm/sec를 기준으로 할 경우 91m ~ 117m의 이격거리가 필요한 것으로 예측된다.

따라서, 주변상황을 고려한다면 발파에 의한 굴착공법은 주변의 민원을 야기할 것이며, 발파지점에서부터 70m 내외에서는 국내 진동레벨 기준치인 70 dB(V) 이상, 110 m 내외에서는 일본 大阪府의 기준치인 0.05 cm/sec이상의 진동이 발생할 것으로 사료된다.

현장 소음 예상 수준

건설 공사용 장비에 의한 소음레벨은 그 종류가 많을 뿐 아니라 같은 기계라도 그 사용 목적 및 운전 조건에 따라 상이하며, 공사장의 주변 상황, 환경(암소음, 풍향, 풍속, 온도, 습도), 지형, 장애물(건물, 담), 수음측의 거리와 주행 상태(속도, 운전부하, 노반 상태)에 따라 크게 영향을 받는다.

국립환경 연구소(1992)⁵⁾에서 제시한 현재 건설현장에서 사용되는 건설 기계들의 공정별 작동원리에 따른 Over-All 소음도를 나타낸 것에 의하면 암반굴착시 유압식 브레이커 공법

을 사용할 경우 7m 이격거리에서 평균 98dB(A)의 소음수준이 나타나는 것으로 제시되어 있다.

발파나 건설장비에 의해 대기로 방출되는 음압의 세기는 일반적으로 dB(A)로 표시되며, 일상생활에서 측정되는 음압의 수준은 식(9)와 같이 측정된다.

$$L_p = 20\log_{10}\left(\frac{P}{P_0}\right) \quad (9)$$

여기서,

P : 측정 음압(Sound Pressure)

P₀ : 기준 음압(Reference

Pressure=2×10⁵ Pa)

발생원으로부터 방출되는 음파는 거리에 따라 분산되며, 발생원을 점의 형태로 가정하였을 때 발생원으로부터 거리 r인 지점에서의 음파의 Intensity, I는 다음과 같이 표시된다.

$$I = \frac{W}{4\pi r^2} \quad (10)$$

따라서, r=r₁에서의 소음수준을 L_{w1}이라 하고 r=r₂에서의 소음수준을 L_{w2}라 하면,

$$L_{w1} = 10\log_{10}\left(\frac{W}{4\pi r_1^2 W_0}\right) \text{ 및}$$

무진동 파쇄공법은 암반이나 콘크리트 등의 파쇄작업을 시행함에 있어 근접한 시설물을 보호해야 하는 특수한 발파조건이 요망되거나, 화약 또는 기계 사용시에 발생하는 시공의 불편 및 환경공해, 공기지연 등의 문제를 해결할 수 있다.

$$L_{w2} = 10 \log_{10} \left(\frac{W}{8\pi r_1^2 W_o} \right)$$

$$= L_{w1} - 20 \log_{10} 2$$

$$= L_{w1} - 6.02$$

의 관계가 성립하므로 거리가 배로 증가함에 따라 소음수준은 약 6dB(A)씩 감소하게 된다.

상기에서 언급한 Over-All 소음도⁵⁾에 의하면 거리가 7m에서 15m로 증가하면서, 7dB(A)가 감소하는 것으로 나타나므로 Breaker의 소음수준은 7m에서 거리가 배로 증가하면서 약 6dB(A)씩 감소할 것으로 예상된다.

따라서, 본 현장에서 Breaker 작업 시의 거리에 따른 소음수준은 아래 (표 3)과 같이 추정된다.

이상과 같은 결과로부터 본 현장에서 Breaker로 암반 굴착을 진행할 경우 생활소음 규제법의 1일 4시간 미만의 주간소음을 기준으로 하여도 주거지역의 허용치인 75dB(A)를 만족시키기 위해서는 110m이상의 이격거리가 필요한 것으로 예측된다. 특히, 본 현장의 경우는 측사가 인접

하고 있어 암반 절취시 소음에 대한 적절한 대책이 요구된다.

따라서, 충돌방지나 공명방지 등 적절한 소음감소 대책을 적용할 경우 도 3 ~ 5dB(A) 이상의 소음감소 효과를 얻기 어렵다고 알려져 있으므로 암파쇄시 Breaker 작업구간은 주거 지역에서 최소한 약 60m 이상의 이격거리를 확보하여야 한다.

암반 절취 공법 타당성 검토

국내·외에 소개된 발파진동 추정치를 이용하여 예상되는 진동을 추정하여 본 결과, 발파지점에서부터 70m 내외에서는 국내 진동레벨 기준치인 70 dB(V) 이상, 110 m 내외에서는 일본 大阪府의 기준치인 0.05 cm/sec이상의 진동이 발생할 것으로 사료된다. 또한 암반 절취부의 60m부근에 군부대의 탄약고가 위치하고 있는데, 육군의 폭파장 운용 규정에는 탄약 저장소로부터 800m이내에서는 발파를 하지 못하도록 하고 있다.

따라서 이와 같은 본 현장 주변지역의 현황을 만족시키고 경제성과 시공성을 극대화 시킬 수 있는 암반 절취를 위한 새로운 공법인 무진동 파쇄기술에 대하여 검토하였다.

무진동 파쇄공법은 암반이나 콘크리트 등의 파쇄작업을 시행함에 있어 근접한 시설물을 보호해야 하는 특수한 발파조건이 요망되거나, 화약 또는 기계 사용시에 발생하는 소음·진동, 비산·분진 등에 의한 시공의 불편 및 환경공해, 공기 지연 등의 문제점을 해결할 수 있다. 그러나, 소음의 경우 무진동 파쇄공법 역시 상당량 {10m 기준 : 75 ~ 100 dB(A)}을 발생시키므로 신중한 고려가 필요하다.

상기에서 검토한 바와 같이, 본 현장에서 암반 절취를 위한 공법으로서 발파를 적용하기는 어려우며, 인접 민가에 대해 환경청 소음기준 75dB(A)을 준수해야 한다는 점을 감안하고, 경제성 및 시공성 측면에서 비발파에 의한 암반 파쇄 공법을 검토한 결과, 다음과 같이 요약되며 이를 기준으로 유압Jack 파쇄 공법과 Breaker공법의 병행 적용을 제안한다.

① 팽창성 파쇄제 공법은 비경제적·비효율적이며 Breaker에 의한 2

(표 3) 거리에 따른 소음수준

이격거리(D ; m)	7	14	28	56	112
소음수준 [dB(A)]	98	92	86	80	74

차 파쇄가 반드시 실시되어야 하므로 2차 파쇄시 지속적인 소음 대책이 필요하다.

② Plasma Blasting공법 적용시 순간 Peak 등가소음치가 소음기준을 상회하며 본 현장과 같이 절취 물량이 소량일 경우에는 경제성의 이점을 살리기 어렵다.

③ 유압Jack을 이용한 파쇄 공법은 경제적이고 시공 효율이 높으며, 당사 현장을 포함하여 시공 사례가 타 공법에 비하여 많다. 또한 정밀 시공으로 Breaker에 의한 2차 파쇄량을 줄임으로써 소음 대책에 적절히 대처할 수 있다.

그리고 유압Jack파쇄 공법의 적용 구간에 대하여는 소음수준 허용치인

75dB(A)을 만족할 수 있는 최소 이격거리 60m와 군부대 탄약고와 인접하고 있는 STA.3+250지역의 암반이 절리의 발달이 거의 없이 상당히 Massive하고 일축 압축 강도가 200MPa에 가깝게 매우 높은 극경암으로 Breaker의 작업이 어려운 여건을 감안하여, Breaker 파쇄공법, 유압Jack 파쇄 공법으로 병용하여 시공하는 것이 타당하다고 판단된다.

마지막으로, 유압Jack을 이용한 무진동 파쇄 공법이 적용된 구간에 대하여도 일부 구간에 한해 Breaker에 의한 2차 파쇄가 필수적으로 진행되어야 할 경우에는 소음수준 허용치인 75dB(A)를 만족할 수 있도록 이동식 방음벽을 이용하는 등의 국부적인 소음 대책이 반드시 실시되어야 한다. SS

참고문헌

1. Huh Ginn, 1983, Blasting standardization work for NATM on sroul subway construction, Jou. of the Korean Institute of Mineral and Mining Engineers., Vol. 24, No. 5, pp. 320~327
2. 이정인 외, 1993, 암발파 설계 기법에 관한 연구, P. 604, 토지개발 공사
3. 이정인, 1996, 도심지 지반 진동 제어를 위한 암발파 설계, 제 1회 한화 기술 심포지움, pp. 314 - 339, 주식회사 한화
4. Gago Gen 역, 1994, 발파진동의 주변에의 영향과 대책, P. 289, 원기술
5. 동아 건설 기술 연구소, 현장 기술 지도서 제 15권 - 소음, 진동 편, P. 310, 동아 건설 산업 주식회사

건축용어 1

알칼리 골재 반응 콘크리트 속에 존재하는 알칼리(Na_2O , K_2O)와 골재에 포함된 알칼리 반응성 광물질 성분이 반응하여 그 생성물이 수분을 흡수하여 팽창되며 콘크리트에 균열, 파괴, 혹은 Pop-Out을 일으키는 현상으로 콘크리트의 내구성이 저하됨

시공줄눈(Construction Joint) 콘크리트의 타설이 일정시간 동안 중단되어 콘크리트의 경화가 된 후 그 위에 새로운 콘크리트를 이어칠 때 생기는 이음면

신축줄눈(Expansion Joint, Isolation Joint) 양생기간, 사용 중에 온도와 습도의 변화에 따른 콘크리트의 팽창, 수축을 조절하기 위한 줄눈, 하중에 의한 콘크리트의 변형도 수용

중성화 공기중의 탄산가스의 작용을 받아 콘크리트 중의 수산화칼슘이 서서히 탄산칼슘으로 되어 콘크리트가 알칼리성을 상실하는 현상

Pop-Out 흡수율이 큰 연석을 사용한 콘크리트에서 동결시에 골재 자신이 팽창하여 표면의 몰탈이 박리되는 현상

염해 콘크리트 중에 염화물이 존재하여 강재(철근, PC강재 등)가 부식함으로써 콘크리트의 구조물에 손상을 끼치는 현상

내구성 성능저하 외력에 저항하며 요구되는 역학적, 기능적 성능을 보유했을 수 있는 능력을 말함(저하원인: 물리적작용, 화학적작용, 설계/시공상의 결함)

조절줄눈(Control Joint, Contraction Joint) 콘크리트의 수축에 의한 구조체의 움직임을 흡수하고, 또한 균열을 조절줄눈 위치에 서 일어나도록 유도하여 다른 장소에서의 균열 발생을 억제

Sliding Joint(미끄럼 줄눈) Slab, 보 등의 구조에 의한 응력을 해제할 목적으로 설치하는 줄눈. 단부는 단순지지(Roller) 형태로 된 Free 상태가 됨