

방폐장 건설 동굴굴착을 위한 심발공법별 시험발파 및 적용사례



이태노
(주)성보지오택
대표이사



노승환
GS건설(주)
지반팀 대리



문준석
(주)도화종합기술공사
지반터널부 부장



김찬기
대진대학교
건설시스템공학과 교수

요지

국내에 건설되고 있는 【중·저준위방사성폐기물 처분시설 건설공사 : 이하, 방폐장】의 건설 및 운영동굴을 굴착하기 위해 국내에서 일반적으로 사용되고 있는 발파공법(Cylinder-Cut, V-Cut)과 건설 신기술로 인증 받은 【단계별 전진식 브이카트 발파공법 : 이하, SAV-Cut】을 동일한 조건에서 총 9회에 걸쳐 시험발파를 실시 하였다. 시험발파를 통해 발파공법별 발파효율, 파쇄석 입도, 여굴상태, 진동 및 소음크기 등을 분석 하였다. 그 결과, SAV-Cut 발파공법이 비교 발파공법 보다 우수한 것으로 확인 되어 방폐장 동굴공사에 SAV-Cut 발파공법을 적용하여 발파작업을 수행하고 있는 사례를 소개하고자 한다.

1. 서론

터널 굴착에서 발파공법은 강력한 폭력을 가진 화약류

를 사용하여 지하 암반을 파쇄 시키는 기술이다. 이 공법은 기계굴착에 비하여 비용이 저렴하고, 다양한 조건에서 유연한 대응이 가능하여 지하 암반의 굴착공사에 많이 이용되고 있다. 그러나, 발파에 의한 터널 굴착은 소음, 진동 및 비산 등의 발파공해를 유발하고, 특히 안전사고의 위험이 상존하고 있다. 하지만, 우리나라의 지하암반은 비교적 강한 화강암과 편마암이 많이 분포되어 있고, 다소 복잡한 지질양상을 보이고 있어 현재까지 발파공법이 터널공사에 있어 가장 적합한 굴착방법으로 여겨지고 있다.

국내에 발파공법이 적용된 지는 약 100년이 되었으나 대형 천공장비에 의한 발파굴착이 터널공사에 본격적으로 도입된 것은 서울에서 지하철 공사가 시작된 80년대 중반이라고 할 수 있다. 짧은 기술역사에도 불구하고 국내의 발파기술은 그동안 많은 공사경험을 통하여 괄목할 만한 발전을 이루었다. 그렇지만, 안전이 무엇보다 중요한 발파공사의 특수성 때문에 보수적인 발파패턴 및 공법

이 관습적으로 사용되고 있는데, 이는 오히려 새로운 기술의 개발과 적용을 어렵게 하는 경향이 있다. 최근 환경 문제에 대한 관심이 증대되면서, 발파에 의한 진동 및 소음에 대한 규제가 더욱 심해지고 있는 현실에서 고정된 기존 발파공법을 고집하여 현장의 생산성을 저하시키고 비용증가를 초래하곤 한다는 것이 현재 국내 발파기술의 한계와 문제점이라 할 수 있다.

발파기술은 굴진효율 증대와 발파 시 발생하는 소음·진동의 최소화를 동시에 달성해야 하는 이율배반적인 목표를 갖고 있다. 장약량이 많을수록 발파효율이 커지고 장약량이 적을수록 소음진동이 작게 발생하는 것은 당연한 일이다. 따라서 발파효과를 높이면서 소음진동을 줄이는 것이 발파기술의 핵심이라고 말할 수 있다.

본 고에서는 국내 터널 현장에서 많이 적용되고 있는 SAV-Cut 발파공법과 기존 발파공법을 방폐장 현장에서 비교 시험한 결과와 적용사례를 소개하고자 한다.

2. 심발공법별 특성분석

2.1 개요

터널 발파공법별 특성은 일반적으로 심발부 발파 메커니즘의 차별화로 구분된다. 즉, 발파공법별 심발공의 천공방법, 천공배열 형태, 길이, 방향, 장약방법, 기폭시스템 등을 조합하는 형태에 따라 심패기가 이루어진다. 국내 터널현장에서 일반적으로 적용하고 있는 발파공법의 종류는 심발부 발파방식 특성에 따라 경사공 심발공법(Angle Cut), 평행공 심발공법(Parallel Cut)과 경사공과 평행공을 조합한 혼합형 심발공법(Complex Cut) 등이 있다. 각각의 심발공법은 표 1과 같은 메커니즘과 특성을 지니고 있다.

본 고에서는 터널 심발공법 중 국내에서 가장 많이 사용되고 있는 공법을 선택하여 시험시공을 수행하였는데, 발파공법별 메커니즘과 특성을 자세히 설명하면 다음과 같다.

표 1. 심발공법별 메커니즘과 특성

심발공법 종류	메커니즘과 특성	대표적인 공법
경사공 심발공법	<ul style="list-style-type: none"> - 심발부 중심선을 대칭으로 경사공을 설치한 후 집중장약하여 암반을 썩기 형태로 파쇄시킴. - 대형된 경사공 공저간격을 15cm 내외로 유지하기 때문에 막장면의 요철로 인하여 천공오차 발생시 공저부분의 간격이 너무 좁아지거나 멀어져 발파효율이 떨어짐. - 경사공에 집중장약 하여 발파하기 때문에 발파진동 및 소음이 크게 발생함. 	V-Cut Fan-Cut
평행공 심발공법	<ul style="list-style-type: none"> - 심발부에 대구경 무장약공과 장약공을 평행하게 천공한 후 장약공을 순차적으로 기폭하여 암반을 파쇄시킴. - 대구경의 무장약공 2~3개를 설치해야 하므로 천공 시간이 너무 많이 소요됨. - 무장약공과 장약공과의 저항선이 20cm 내외이므로 약간의 천공오차가 발생해도 공이 관통되거나 벌어져 발파가 실패됨. 	Cylinder-Cut Burn-Cut NO-Cut
혼합형 심발공법	<ul style="list-style-type: none"> - 심발부에 경사공과 수직공을 동시에 설치한 후 공법별 메커니즘에 맞게 장약 및 기폭으로 암반을 파쇄시킴. - 발파효율을 증대 시킬 수 있고 진동 및 소음을 저감할 수 있음. - 기존의 경사공과 평행공 발파공법 단점을 개선한 공법이나, 천공수가 많아지고 뇌관배열이 다소 복잡함. - 국내 발파 기술자가 익숙해있지 않기 때문에 사용상의 미숙함과 기피하는 현상이 발생하고 있음. 	SUPEX-Cut COPA-Cut SAV-Cut

2.2 V-Cut 발파공법

V-Cut 발파공법은 심발부 중심을 대칭축으로 하여 막장에서 65° 내외 각도로 좌우에 경사공을 천공하며, 경사공 간의 공저간격을 약 15~20cm 간격으로 유지한다. 이 공법에서는 경사공의 공저부분을 집중시켜 썰기형의 파괴효과를 얻기 위해서 경사공에 집중적으로 장약하여 압축 및 전단파괴의 원리에 의하여 심빼기가 이루어진다. 이 공법은 심발공 패턴이 단순전단파괴의 형태로 사공이 간단하여 터널 발파기술자들이 가장 선호하는 발파공법으로서 국내에 가장 먼저 도입된 발파기술이다. V 형태의 썰기형 심빼기 발파공법은 장약량 및 천공수는 암질상태, 천공직경, 천공길이 및 폭약의 종류에 따라 결정되지만, 근본적으로 공당 장약밀도, 경사공의 천공각도, 경사공의 공저간격은 반드시 원리에 맞게 설계되고 시공되어야 높은 굴진효율을 유지할 수 있다. 그림 1은 V-Cut 발파공

법 심발부 천공 배열도이다.

2.3 Cylinder-Cut 발파공법

Cylinder-Cut 발파공법은 심발부에 대구경 무장약공과 장약공을 일정한 간격으로 평행 천공한 후 장약하여 심빼기 작업이 이루어지는 발파공법이다. 이 발파공법은 기존의 Burn-Cut 발파공법을 개량한 발파공법으로서, 대구경의 무장약공을 천공하여 이를 자유면으로 활용할 뿐만 아니라 파쇄암석이 분출되는 공간으로 활용된다. 이러한 메커니즘의 특성으로 천공장을 늘리고 발파효율을 증대시킬 수 있을 뿐만 아니라 발파진동 또한 상당히 제어할 수 있다. 이 발파공법은 대형 천공장비인 Jumbo Drill을 이용하여 천공하므로 천공 작업자의 천공능력에 따라 발파효율이 좌우된다.

그림 2는 Cylinder-Cut 발파공법 심발부 천공 배열도이다.

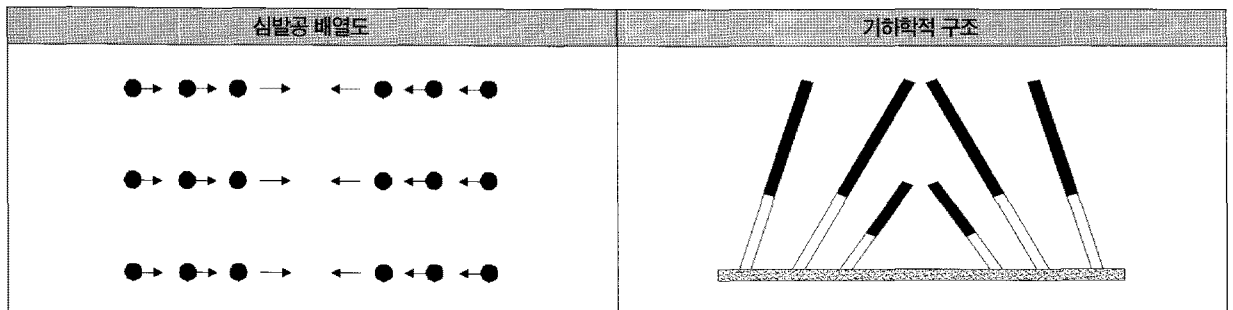


그림 1. V-Cut 발파공법 심발부 천공 배열도

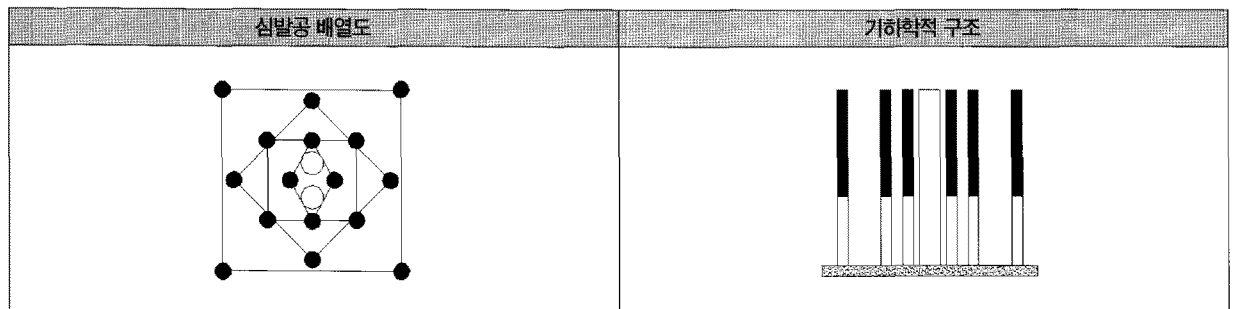


그림 2. Cylinder-Cut 발파공법 심발부 천공 배열도

2.4 SAV-Cut 발파공법

1) SAV-Cut 발파공법 원리 및 특성

SAV-Cut 발파공법은 기존 V-Cut 발파공법의 문제점 및 한계성을 개선한 발파공법으로서 국내 특허기술이다. 이 발파공법은 기존의 V-Cut 발파공법의 V 공 대칭축에 수직의 중앙공을 설치하는 발파공법으로서 V-Cut 발파공법의 가장 큰 문제점인 경사공 공저부분의 천공오차와 파괴력 저하 현상을 보완한 새로운 개념의 발파공법이다. 이와 같은 메커니즘 및 기폭 시스템은 사전에 암반을 취약화시킬 수 있어서 파괴 구속력을 약화시킬 수 있고 장약밀도가 낮기 때문에 진동발생을 저감시킬 수 있다. 그림 3은 SAV-Cut 천공 배열도와 단공 및 장공 발파시의 심발공 단면도이다.

2) SAV-Cut 발파공법 작업방법 및 기술

터널 심발발파에서 인장파괴 영역을 최대한 확보하고자 심발부에 중앙공을 설치한다. 시공의 편의를 위해 경사공과 같은 열에 경사공의 천공장과 동일하게 천공하며

중앙공은 대칭된 경사공과 경사공 공저 사이로 관통된다. 이 때문에 공저부의 파괴가 효과적으로 이루어지며, 기존 15~20cm인 공저 간격을 30cm 정도로 완화할 수 있어 천공오차에 의한 발파 실패를 방지할 수 있다. 또한 경사공의 천공각도를 70° 내외로 유지하여 기존 V-Cut 보다 경사공 천공수를 줄여 시공이 용이하도록 하였다. 심발부에 중앙공이 추가됨으로써 공저부의 장약량이 50% 증가되며, 이는 Rune Gustafsson이 제안한 공저부 장약밀도 2.0kg/m에 근접하는 수준이다. 따라서 경사공의 장약량을 합리적 수준으로 적용할 수 있어 발파에 의한 진동 및 소음을 저감시킬 수 있다.

SAV-Cut 발파공법은 굴진장 2.0m를 기준으로 단공과 장공 패턴 2가지로 구분된다. 중앙공 선기폭 후 경사공 기폭 시스템은 동일하며, 굴진장 2.0m를 초과하는 장공 발파패턴에서는 2.0m를 최소저항선으로 하는 보조경사공을 설치하고, 보조경사공 위치에 맞추어 중앙공에 분할장약을 하게 된다. 그림 4는 장공발파시 발파 시뮬레이션 예이다.

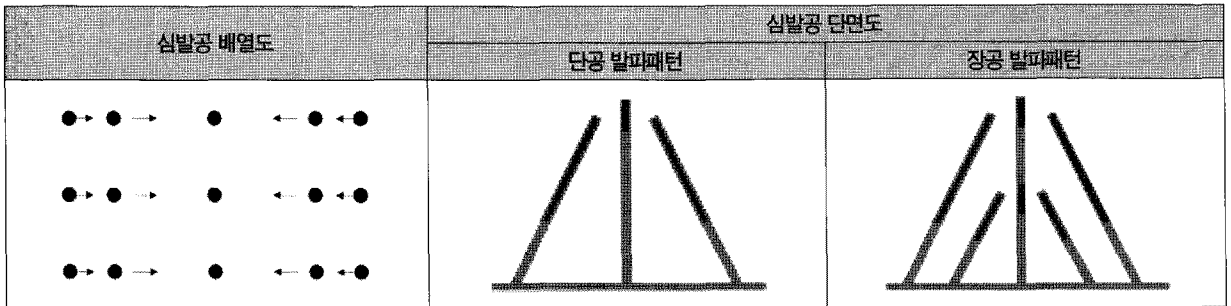


그림 3. SAV-Cut 천공 배열도와 단공 및 장공 발파시의 심발공 단면도

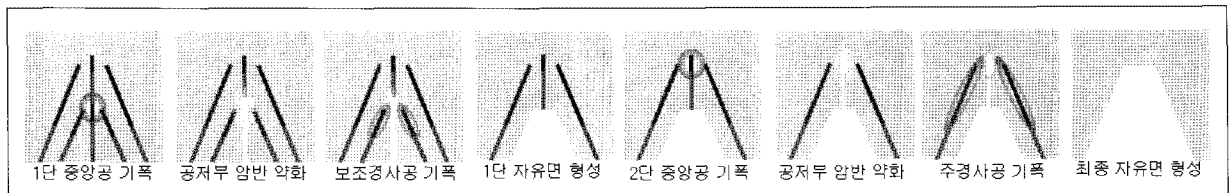


그림 4. SAV-Cut 장공발파 시뮬레이션

3. 심발공법별 현장 시험발파 수행 및 결과분석

3.1 개요

터널 심발공법별 시험발파는 경북 경주시 양북면에 위치한 방폐장 현장에서 수행되었다. 시험발파의 목적은 국내에서 가장 많이 사용하고 있는 터널 발파공법(V-Cut, Cylinder-Cut)과 건설 신기술로 인증받은 SAV-Cut 발파공법을 동일한 조건에서 시험발파를 수행한 후 시공성, 경제성, 안전성, 품질환경성을 종합적으로 검토하여 방폐장 현장에 적합한 최적의 발파공법을 적용하기 위해 실시되었다. 본 현장의 기반암은 중생대 백악기 경상계 불국사통 화강암류의 각섬석 화강암으로 분포되어 있으며, 시험발파 대상 터널인 건설동굴의 암반상태는 불연속면이 발달하고 약간의 풍화작용을 받았다. 그림 5는 본 현장의 시험발파 구간 막장 관찰도와 막장 모습이다.

3.2 시험발파 방법 및 내용

시험발파는 발파공법별로 3회씩 총 9회에 걸쳐 수행되었으며, 시험발파 패턴 및 수량은 각 공법별 메커니즘

과 설계기준에 맞게 설정하였다. 발파공법별 객관적 발파 결과 데이터를 수집하기 위해서 발파공법별로 발파순서를 바꿔가면서 수행되었으며, 정확한 천공을 위해서 천공 전에 막장면에 천공위치를 정확히 표기하였다. 또한, 천공각도를 확인하여 문제가 발생할 경우에는 재천공을 실시하였다. 발파진동을 정확히 수집하기 위해서 지반에 모르타르를 이용하여 계측기 설치대를 제작하여 사용하였다. 표 2는 발파공법별 시험발파 패턴이며, 그림 6은 시험발파 모습이다.

3.3 시험발파 결과분석

1) 발파효율 분석

발파공법별 발파효율은 크게 굴진효율, 비장약량, 비천공장으로 평가할 수 있다. 굴진효율 분석은 시험발파 후 막장에서 확인되는 잔류공을 측정하여 이루어 졌는데, 잔류공 깊이는 심발부 중심점을 기준으로 좌, 우에 존재하는 잔류공 10~12개의 공에 대하여 줄자(Steel Tape)를 이용하여 측정하였다. 굴진효율은 천공장에 대한 굴진장(천공장-잔류공의 평균값)에 대한 백분율로 산출하였으며, 비장약량은 파쇄된 굴착량에 대한 발파당 사용 화약

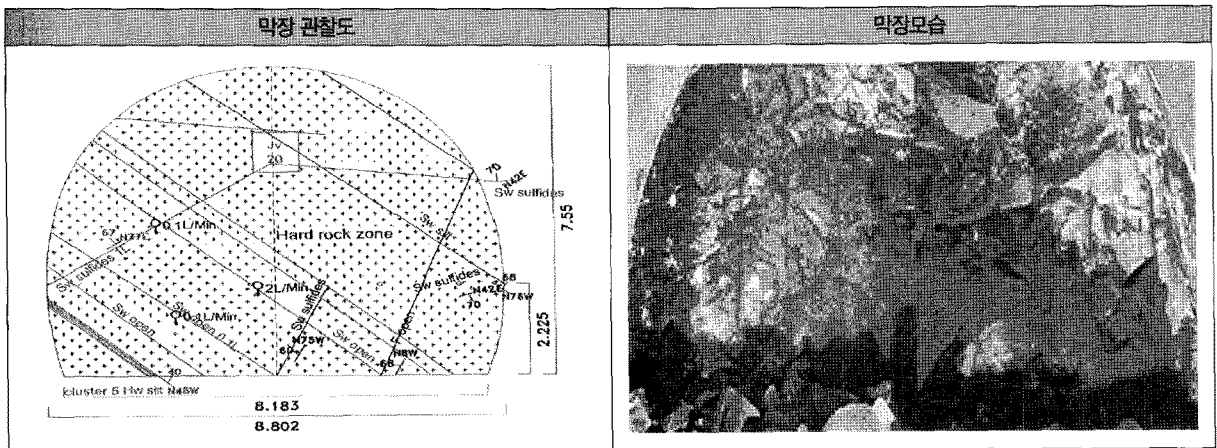


그림 5. 시험발파 구간 막장 관찰도와 막장 모습

표 2. 발파공법별 시험발파 패턴

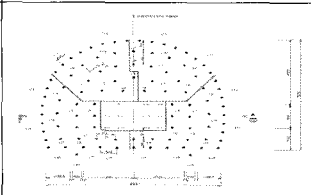
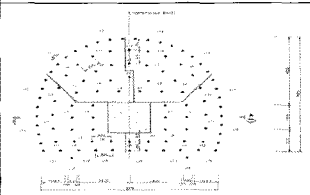
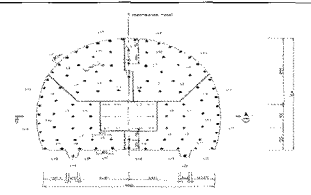
구분	V-Cut	Cylinder-Cut	SAV-Cut
천공장	1.3m	1.3m	1.3m
공당장약량(심발공)	0.64Kg	0.48Kg	0.48Kg
천공수	111공	115공	114공
지발당장약량(심발공)	1.28Kg	0.96Kg	0.96Kg
발파패턴도			



그림 6. 시험발파 모습

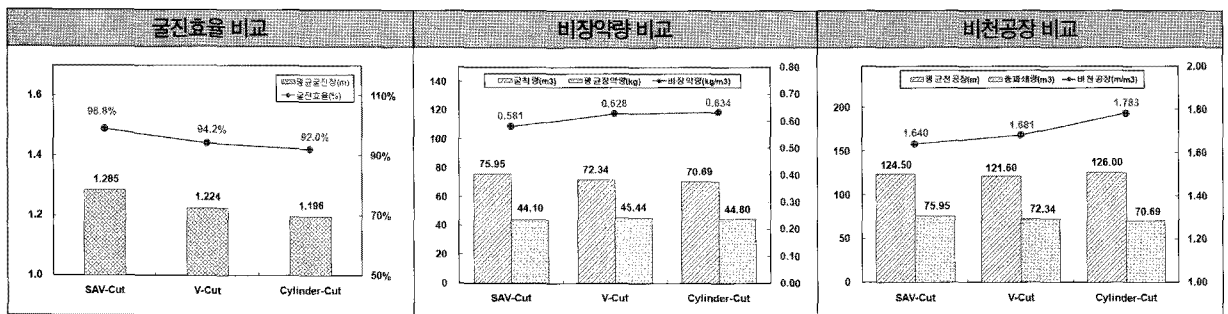


그림 7. 발파공법별 발파효율 분석 결과

량 비율로 산출되고, 비천공장은 발파 후 파쇄된 굴착량에 대한 발파당 총 천공장의 비율로 산출된다. 그림 7은 발파공법별 굴진효율을 분석한 결과이다.

발파공법별 발파를 총 9회에 걸쳐 수행한 후 확인된 평

균 굴진효율을 보면, SAV-Cut 발파공법이 비교 공법에 비해 굴진효율은 4.6~6.8% 높고, 비장약량은 7.5~8.3% 절감되며 비천공장은 2.4~8.0% 작게 산출되었다. 이는, SAV-Cut 발파공법의 경우 경사공의 천공오차에

대한 공저부분의 파쇄저항을 중앙공의 선발파작업으로 공저부분의 암반이 취약화 되어 발파효율이 우수한 것으로 판단된다.

2) 파쇄석 입도분석

발파공법별 파쇄석 입도는 발파후 막장면에 쌓이는 버력 중 입도가 가장 큰 상위 5개를 추출하여 평균값을 구하여 산출하였으며, Split Desk Top 프로그램을 이용하여 파쇄석 더미를 영상처리하여 분석하였다. 그 결과 SAV-Cut 발파공법이 가장 작게 파쇄되어 소할비용이 가장 작게 소요될 것으로 파악되었다. 그림 8은 파쇄석 입도분석 모습을 나타낸 것이다.

3) 발파진동 및 소음 비교분석

발파공법별 발파진동 크기를 비교 분석하기 위해서 동

굴 막장에서 정면의 지반에 5대의 진동측정기를 설치하여 진동속도와 가속도를 측정하였다. 이 중에서 각 발파공법별 설계패턴 시험발파시 막장으로부터 136~139m 지점 지반에 설치하여 측정된 진동 및 소음값을 비교 분석하였다. 또한, 발파공법별 심발부 발파진동크기를 비교 분석하기 위해서 발파해석 프로그램인 『Advance Module Program』을 활용하여 심발부 기폭시차에 대한 시차분석을 실시하여 심발공의 최대 진동값을 산출하였다. 그림 9는 발파공법별 발파진동, 소음 및 심발공 이력곡선 분석 그래프이다.

4) 종합적인 시험발파 결과분석

본 현장 건설동굴에서 발파공법별로 총 9회에 걸쳐 시험발파를 실시한 결과, 발파공법별 굴진효율은 SAV-Cut 발파공법이 가장 높게 나타났으며, V-Cut 발파공법과

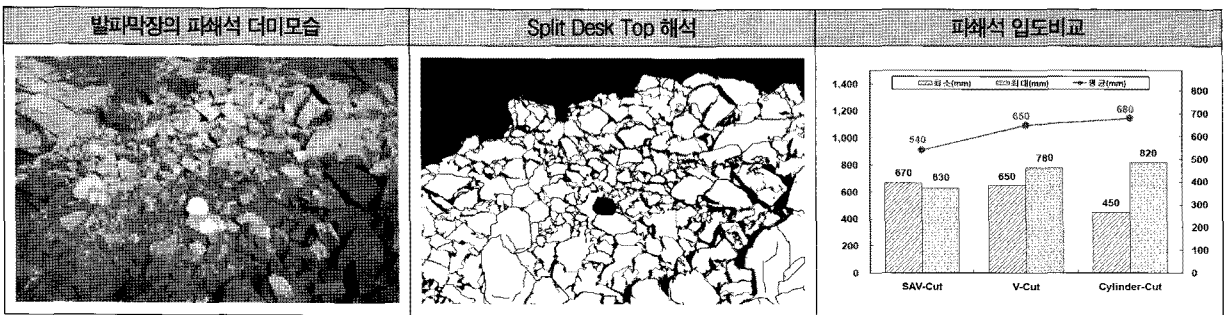


그림 8. 파쇄석 입도분석 결과

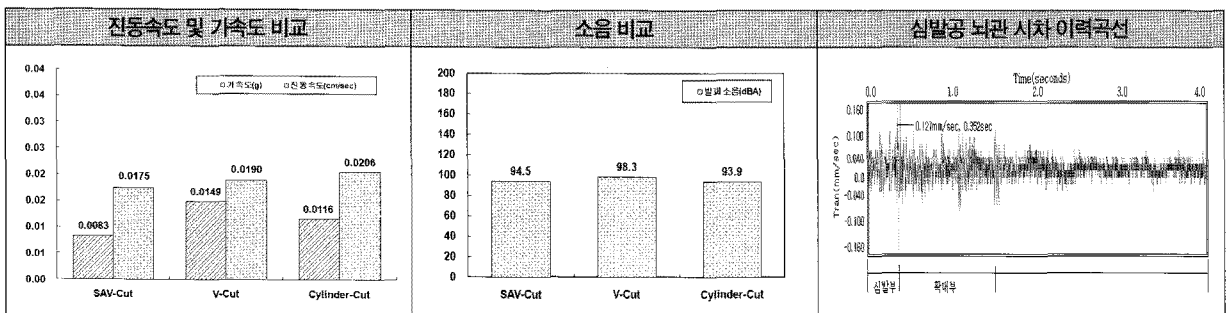


그림 9. 발파공법별 발파진동, 소음 및 심발공 이력곡선 분석 그래프

Cylinder-Cut 발파공법은 비슷한 수준으로 나타났는데, SAV-Cut 발파공법의 경우 경사공의 천공오차에 대한 공저부분의 파쇄저항을 중앙공의 선발파작업으로 공저부분의 암반이 취약화되어 발파효율이 우수한 것으로 파악된다. 또한, 발파공법별 파쇄상태는 SAV-Cut 발파공법이 비교 공법에 비해 상대적으로 입도가 작게 생산되는 것으로 나타났다.

발파공법별 단순 발파진동속도 및 가속도를 비교분석한 결과, 진동속도의 경우 SAV-Cut, V-Cut, Cylinder-Cut 발파공법 순으로 나타났으며, 가속도는 SAV-Cut, Cylinder-Cut, V-Cut 발파공법 순으로 나타났는데, SAV-Cut 발파공법이 가장 우수하게 나타난 이유는 경사공의 천공오차에 대한 공저부분의 파쇄저항을 중앙공의 선발파작업으로 공저부분의 암반이 취약화되어 발파진동 및 가속도가 작게 나타난 것으로 파악된다. 발파공법별 발파소음은 Cylinder-Cut 발파공법이 다른 발파공법에 비해 작게 측정되었는데, 이는 Cylinder-Cut 발파공법 심발부의 공당 장약량이 상대적으로 작기 때문이며, V-Cut은 경사공 발파시 구속력이 큰 심발부 암반을 파쇄하기 때문으로 크게 발생한 것으로 추측된다.

4. 맺음말

터널발파에서 발파효율과 발파공해 발생정도를 평가할 수 있는 가장 기본적인 기준은 심발부의 발파상태를 파악하는 것이다. 다시 말해서 1자유면 상태에서 제일 먼저 기폭되는 심발부의 발파결과가 터널발파 전체의 효과를 좌우하기 때문이다. 그래서 터널발파공법의 개발은 심발부를 중심으로 이루어진다. 국내 터널발파에서 가장 많이 적용되고 있는 심발공법은 V-Cut 발파공법과 Cylinder-Cut

발파공법이다. 또한, 최근래에 국내에서 개발되어 광범위하게 적용하는 발파공법중 심발부 암반을 취약화시켜 발파효율을 증대시키고 발파공해를 저감시킬 수 있는 심발공법으로 SAV-Cut 발파공법이 있다.

본 고에서는 방폐장 현장에서 적용하고자 하는 발파공법을 선정하고자 위의 3가지 공법으로 총 9회에 걸쳐 동일한 조건에서 시험발파를 실시하였는데, 굴진효율, 파쇄상태, 발파진동 부문에서 SAV-Cut 발파공법이 가장 우수하게 나타났으며, 발파소음은 Cylinder-Cut 발파공법이 가장 우수한 것으로 확인되었다. 본 시험발파 결과를 통해서 방폐장 현장에서는 건설 및 운영동굴 굴착을 위한 발파공법으로 SAV-Cut 발파공법을 도입하여 작업을 수행하고 있다.

아울러, 금번 시험발파 결과는 9회에 걸쳐 수행되고 분석한 결과이기 때문에 현장의 발파조건과 암반상태에 따라 달리 나타날 수도 있을 것으로 예상되나, 터널발파공법별 심발부의 메커니즘(천공, 장약, 기폭 시스템)과 암반 특성(강도, 비중, 불연속면의 구조적특성)이 얼마나 조화롭게 반응하여 우수한 발파효과로 도출되는냐가 매우 중요하다고 사료된다.

참고문헌

1. Stig O Olofsson (1990) "Applied Explosives Technology for Construction & Mining", pp. 131-139.
2. Giorgio Berta, (1990) "Explosives : An Engineering Tool", Italesplosivi, Milano, pp. 153-161.
3. Rune Gustafsson, (1981) "Blasting Technique", Dynamit Nobel Wien, pp. 143-146.
4. P. A. Persson, R. Holmberg, and J. Lee, (1994) "Rock Blasting & Explosives Engineering", pp. 240-244.
5. 김재극(1986), "산업화학과 발파공학" pp. 300-310.
6. 한국건설기술연구원(2006), "단계별 전진식 브이컷 발파공법(SAV-Cut)", pp. 14-18.