

터널 심발발파공법 SAV-Cut(Stage Advance V-Cut)의 특징 및 현장적용 사례 연구

김동현¹⁾ · 이상필¹⁾ · 이훈연¹⁾ · 이태노²⁾ · 전석원³⁾

1. 서 론

현재 국내 대부분의 터널은 천공·발파 기법을 이용하여 굴착되고 있다. 심발발파는 터널 굴착면의 1 자유면 상태에서 가장 먼저 발파가 이루어지므로 터널발파에서 가장 중요한 단계이며 전체의 굴진효율과 진동 및 소음을 결정하는 역할을 한다. 일반적으로 국내 심발발파로 설계되고 있는 공법은 대표적으로 Cylinder-Cut과 V-Cut 외에도 국내 신기술로 인증 받은 바 있는 Supex-Cut, COPA-Cut, HTB 발파공법 등이 있다. 이 중 Cylinder-Cut과 V-Cut이 터널 심발발파공법으로 설계에 가장 많이 적용되고 있다. Cylinder-Cut은 대구경 무장약공(Ø102mm)을 심발부 중심에 설치한 후 이와 근접해서 장약공을 터널 굴진방향과 동일하게 천공하는 발파공법으로 굴진장 2.0m 이상인 국내 대다수 터널설계에 적용되고 있다. 그렇지만 천공 시 오차가 발생할 경우 소결현상 및 cut-off 현상이 발생하여 발파효율이 저하된다. 또한, 무장약공 천공을 위해서는 천공빗트 교환이 필요한데, 여기에 소요되는 시간과 노력은 현장적용을 어렵게 한다. 따라서 대부분의 현장에서는 시공이 간단한 V-Cut을 심발발파에 적용하고 있다. V-Cut은 굴진장 2.0m 이하의 터널설계에 적용되는 공법으로 터널 중앙을 중심으로 약 60°의 경사공을 터널굴진방향으로 좁게 천공하고 집중장약을 통해 심발을 V 모양으로 형성하는 방법이다. 이 때, 공저간격이 좁게 유지되고 공저부가 밀장약 될 때 파쇄효과가 우수하게 된다. V-Cut은 시공하기가 가장 쉽다는 장점으로 인해 현장에서는 단공 뿐 아니라 장공에서도 활용되고 있으나, 경사공의 천공각도가 어긋날 경우 공저간격이 너무 넓거나 엇갈리게 되어 발파효율이 저하되며, 장공에서는 자유면에서의 공간격이 너무 넓어 종종 발파실패의 원인이 된다. 이러한 Cylinder-Cut과 V-Cut의 약점을 극복하기 위해 새로운 심발발파 공법들이 개발·적용되어 왔으나, 이론 및 메커니즘의 개선과는 별개로 시공성의 문제가 공법의 확대적용에 있어 중요한 장애가 되어온 것이 현실이다. 여기서는 기존의 V-Cut 공법의 시공 편의성을 최대한 활용하면서 굴진효율을 개선시킨 새로운 심발발파 방법인 SAV-Cut (Stage Advance V-Cut) 공법을 소개한다. SAV-Cut 공법은 건설교통부에서 지정하는 건설 신기술(제518호)으로서 중앙공을 천공 및 선기폭하여 암반을 약화

1) GS건설

2) 성보지오택

3) 서울대학교

시킨 다음 경사공을 단계별로 기폭하는 것을 주요 특징으로 하고 있다. SAV-Cut 발파공법의 메커니즘은 수치해석과 여러 현장에 실제 적용을 통하여 발파효율의 증대와 진동저감 효과를 검증하였다.

2. SAV-CUT 발파공법의 원리 및 특징

V-Cut 발파공법은 터널 중앙을 중심으로 약 60°의 경사공을 터널굴진 방향으로 천공하고 공저부 집중장약을 통해 심발을 V 모양으로 빼내는 것으로 켄네파괴의 효율적 메커니즘을 이용한다. 높은 효율을 위해서는 공저부의 충분한 파괴가 전제되어야 하며, Gustafsson (1981)에 의하면 공저간격을 좁게 유지하고 공저부 장약밀도가 2.0 kg/m로 밀장약될 때 파쇄효과가 가장 우수하다. V-Cut은 시공하기가 쉽다는 장점으로 인해 현장에서 굴진장과 관계없이 많이 활용되고 있으나, 그림 1과 같이 카트리지 화약 장약 시 공저부가 밀장전되지 않아 공저부 파괴가 미흡하게 되고, 또한 그림 2의 경우처럼 경사공의 천공각도가 어긋날 경우 공저간격이 너무 넓거나 엇갈리게 되어 발파효율이 저하되는 현상이 발생한다.

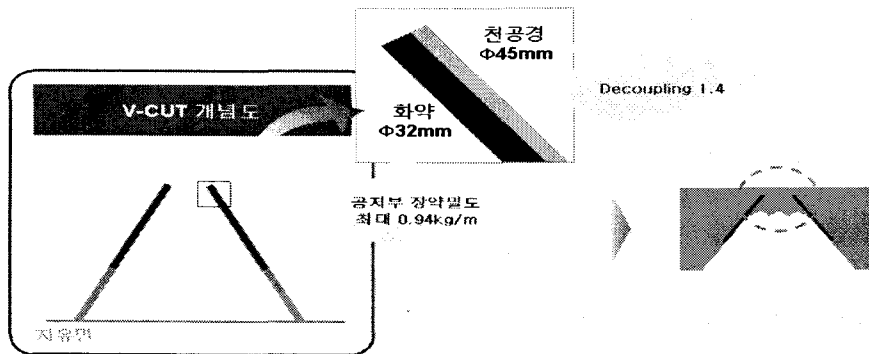


그림 1. V-Cut의 공저부 장약 문제

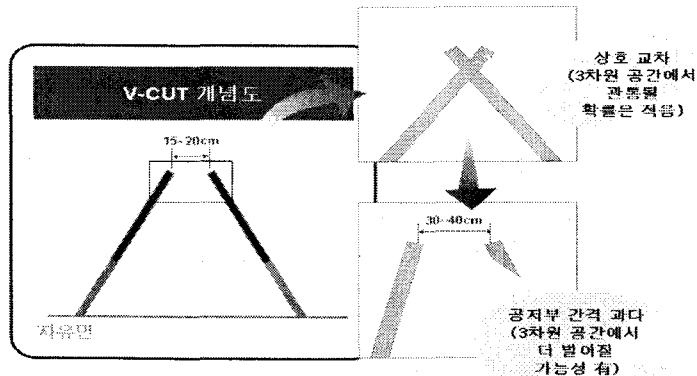
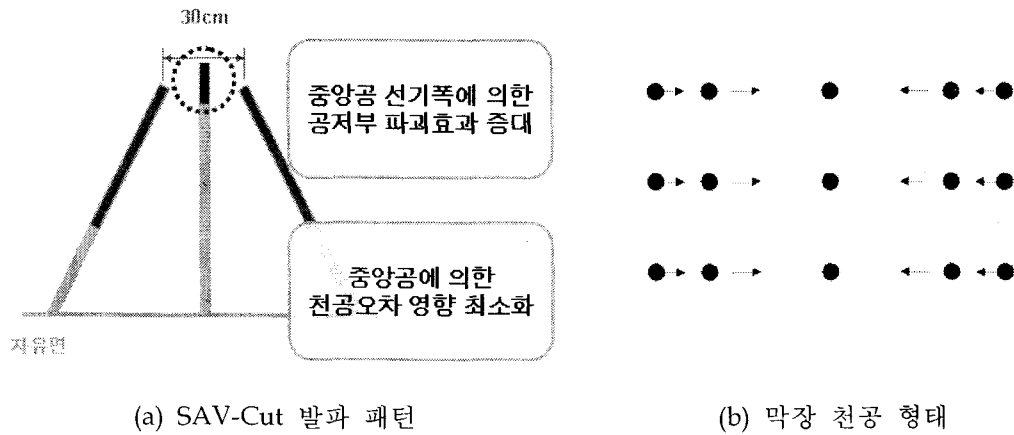


그림 2. V-Cut의 천공오차 문제

SAV-Cut 발파공법은 V-Cut 2가지 문제점인 불충분한 공저부 장약과 천공오차에 의한 발파효율 저하를 방지하기 위해 그림 3과 같이 중앙공의 메커니즘을 적용한다. 중앙공 장약으로 공저부 장약량을 V-Cut에 비해 50% 증대시킬 수 있고, 경사공과 같은 열 상에 중앙공을 설치함으로써 경사공 공저부의 간격 증가로 인해 발생하는 공저부 파괴 저하 현상을 방지할 수 있다. 또한 Clover-Cut과 달리 SAV-Cut은 중앙공 선기폭 후 경사공 기폭의 단계별 기폭이 가능하여 공저부 장약량 증가에 의해 발파진동 및 소음이 증대되는 현상이 없다. 오히려 중앙공 선기폭을 통해 공저부 압반을 약화시킬 수 있고, 이는 표 1의 발파계수 C를 저감시킴으로써 하우저 공식($L = C \cdot W^3$)에 의해 경사공의 장약량을 줄일 수 있어 국내 화약의 제원으로 충분히 최적 장약량을 만족시킬 수 있음과 동시에 발파에 의한 진동 및 소음을 저감시키는 것이 가능하다.



(a) SAV-Cut 발파 패턴

(b) 막장 천공 형태

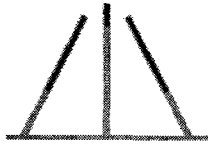

그림 3. SAV-Cut의 개념도

표 1. 암질에 따른 발파계수(기경철, 김일중, 2002)

암 질	C	암 질	C
대단히 연질인 암석(충적토), 모래가 고결된 것	0.11	중경의 석회암, 점판암, 석영조면암	0.35
		중경의 현무암	0.36
부드러운 석회암	0.20	경질의 점판암, 입형석회암, 현무암	0.40
연질의 역암 및 사암	0.26	석영조면암, 응회암, 안산암	0.42
연질의 운모편암	0.28	보통 경도의 화강암	0.45
경질의 역암 및 사암	0.30	보통 경도의 편마암, 반암	0.45
중경의 운모편암	0.32	경질의 화강암 및 석영조면암	0.57

표 2는 SAV-Cut의 대표단면으로 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 장공발파 시 시뮬레이션 예이다.

표 2. SAV-Cut 발파패턴

구분	단면도	특징	적용암반
단공발파 패턴		- 중앙공 천공 및 장약 - 중앙공 선기폭 후 경사공 기폭	- 굴진장 2.0m 이하의 단공발파 : 표준단면 3, 4, 5, 6
장공발파 패턴		- 중앙공 천공 및 분할장약 - 보조경사공 설치 - 중앙공 선기폭 후 경사공 기폭	- 굴진장 2.0m 초과 장공발파 : 표준단면 1, 2

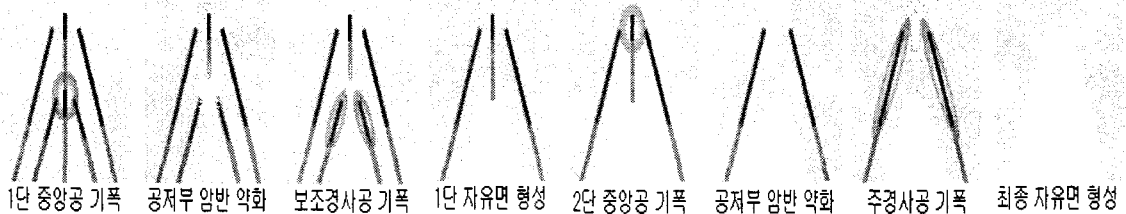
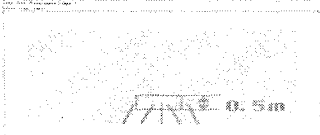
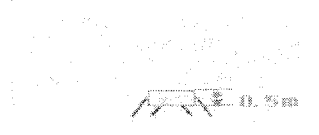
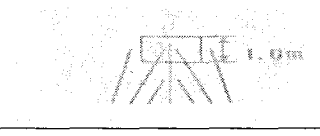
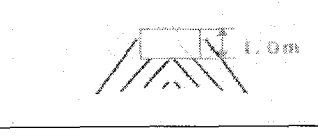


그림 4. SAV-Cut 시뮬레이션 (장공발파)

3. SAV-CUT 발파공법의 수치해석을 이용한 효과 검증


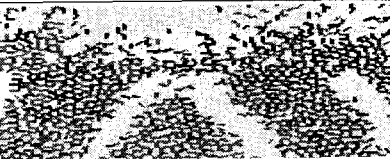

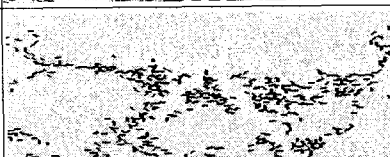
터널 심발부 공저부에서의 파괴효과와 발파에 의한 진동특성을 분석하기 위해 PFC2D(Particle Flow Code 2D) 수치해석을 실시하였다. 해석 영역의 크기는 표 3과 같이 가로 10 m, 세로 6 m의 직사각형 형태로 모델링하였고, 암반 등급은 I Type 과 IV Type에 대해 V-Cut 과 SAV-Cut 발파공법을 비교하도록 하였다. 이 때 공저부 파괴 영역을 box 부분으로 설정하여 분석하였다.

표 3. PFC2D 해석모델

암반등급	SAV-Cut	V-Cut
IV Type		
I Type		

분석 결과, 표 4와 같이 Type IV의 경우 SAV-Cut이 V-Cut에 비해 심발부 장약량이 18.8% 적었으나, 인장파괴 개소는 108.1%가 증가하였고 전단파괴 개소는 11.8%로 다소 감소하면서 전체 파괴 개소는 12%가 증가하였다. Type I에서는 SAV-Cut이 V-Cut에 비해 심발부 장약량이 21.4% 적음에도 불구하고, 인장파괴 개소는 41.2%가 증가하고 전단파괴는 128%가 증대하여 전체 파괴 개소가 47.3% 증가하였다. 따라서 중앙공 선기폭에 의해 공저부 암반이 약화됨으로써 경사공 기폭에 의해 공저부 파괴가 증가됨이 검증되었으며, 특히 장공발파일 경우 효과가 커짐을 확인하였다.

표 4. SAV-Cut과 V-Cut의 공저부 파괴 효과 (PFC 2D)

Rock class	Cut-Type	Charge(kg)	Tensile failure (개소)	Shear failure (개소)	Total failure (개소)	Simulation (after 0.2sec)
IV	SAV-Cut	3.25	283	341	624	
	V-Cut	4.00	136	422	558	
I	SAV-Cut	13.2	469	57	526	
	V-Cut	16.8	332	25	357	

PFC2D 수치해석을 통해 SAV-Cut과 V-Cut 심발발파공법별로 발생하는 발파진동속도를 비교하기 위하여 그림 5와 같이 모델을 설정하였다.

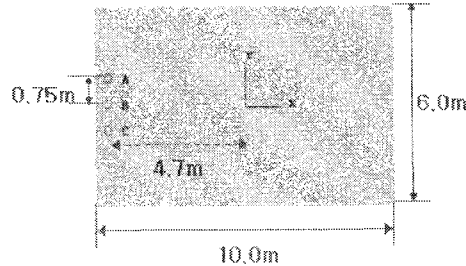


그림 5. 발파진동 해석 모델

분석 결과 표 5와 같이 SAV-Cut이 V-Cut에 비해 최대발파진동속도가 Type IV에서 16~51%, Type I에서는 24~39% 작게 발생하였다. 따라서 SAV-Cut의 메커니즘이 V-Cut에서 발생하는 최대발파진동속도를 저감할 수 있음이 검증되었다.

표 5. 발파공법별 최대발파진동속도(m/sec) 비교

Type Position	Type IV			Type I		
	SAV-Cut	V-Cut	진동감쇠	SAV-Cut	V-Cut	진동감쇠
A	1.14	2.36	51.7% ↓	2.33	3.07	24.1% ↓
B	1.16	1.39	16.6% ↓	2.43	3.97	38.8% ↓
C	1.26	1.69	25.4% ↓	2.64	3.92	32.7% ↓

4. SAV-CUT 발파공법의 현장적용 사례

SAV-Cut 발파공법은 1998년 인천 LPG 지하비축기지 공사에서 발파효율 증진을 위해 개발된 이래 다수의 현장에 적용하여 그 성능을 입증하였다. 그 중 3곳의 현장적용 결과에 대해 소개한다.

4.1 OO 철도건설 현장

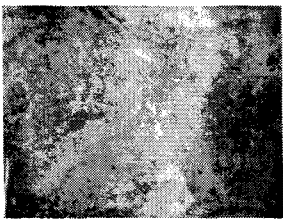
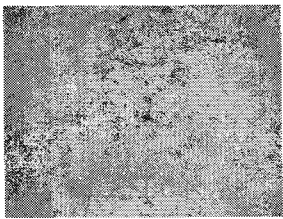
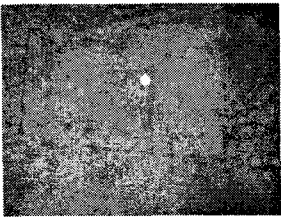
전라남도에 위치한 당 현장의 기반암은 응회암이며 암반 Type I, II, III에서의 심발발파공법은 Cylinder-Cut으로 설계되어 있었다. 표 6과 같이 Type I (굴진장 : 3,500 mm) 구간에서 V-Cut, Cylinder-Cut, SAV-Cut 발파공법을 각 1회 시험발파를 수행하였고 보조경사공 단수는 V-Cut에는 2단, SAV-Cut에는 1단을 적용하였다.

표 6. 시험발파 발파패턴 및 제원

발파공법별		단 위	SAV-Cut	Cylinder-Cut	V-Cut
천 공 장	주 경사공	mm	4,190	-	4,390
	확대공	mm	3,800	3,800	3,800
심발부	보조경사공단수	단	1	-	2
	장약공수	공	15	18(무장약공 2)	18
총장약량		kg	268.425	279.675	275.175

적용 결과, 표 7과 같이 보조경사공 단수가 적음에도 불구하고 굴진효율과 발파진동 측면에서 SAV-Cut이 V-Cut, Cylinder-Cut에 비해 우수하였으며, 발파소음의 경우는 Cylinder-Cut이 가장 적었다.

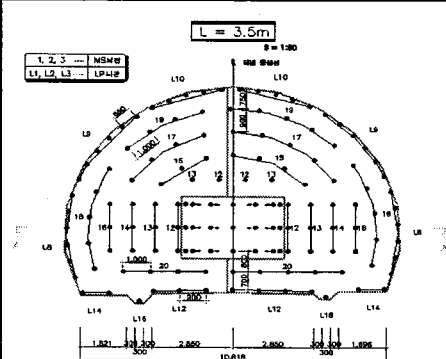
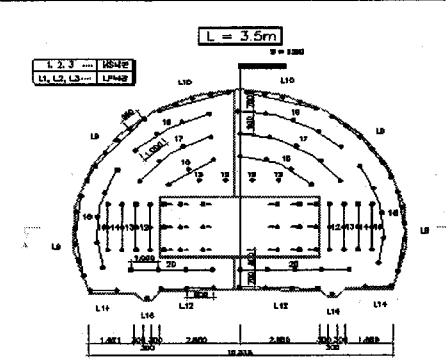
표 7. 시험발파 적용 결과

구분	SAV-Cut	Cylinder-Cut	V-Cut
천공모습			
굴진효율(%)	92.1	81.5	82.9
발파진동(cm/sec) - 260m 이격	0.170	0.344	0.179
발파소음(dBA) - 260m 이격	95.8	94.0	102.7

4.2 OO 국도건설 현장

경상북도에 위치한 당 현장의 기반암은 응회암이며, 표 8과 같이 암반 Type II에서 천공장을 3.5m로 하여 V-Cut, SAV-Cut 발파공법에 대해 각 1회씩 시험발파를 수행하였다. 이때 굴착단면적은 82.383m² 이고 보조공 단수는 V-Cut과 SAV-Cut이 동일하게 1단을 적용하였다.

표 8. 시험발과 발파패턴 및 제원

구 분	SAV - Cut	V - Cut
총천공수	140 공	137 공
총장약량	265.0 kg	269.5 kg
공당 장약량	중앙공	-
	보조경사공	1.3125 kg
	주경사공	2.625 kg
	확대공	2.25 kg
발파도면		

적용 결과, 표 9와 같이 발파효율 측면에서 SAV-Cut이 95% 이상으로 V-Cut에 비해 4.3% 향상되었다. 발파진동과 소음 저감 측면에서도 SAV-Cut이 V-Cut에 비해 우월함을 확인할 수 있었다.

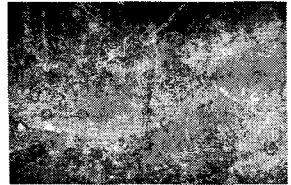
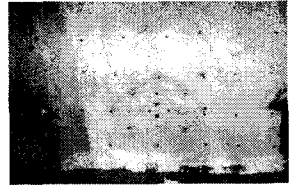
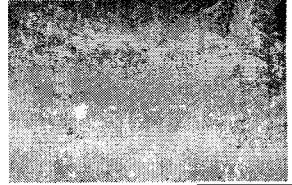
표 9. 시험발과 적용 결과

구 분	SAV - CUT	V - CUT	비교분석
발파효율	천공장	3.50 m	4.3% 증대
	굴진장	3.35 m	
	효율	95.7 %	
비장약량	총장약량	265.0 kg	6.0% 절감
	굴착량	279.00 m ³	
	비장약량	0.950 kg/m ³	
비천공장	총천공장	483.61 m	3.3% 절감
	굴착량	279.00 m ³	
	비천공장	1.733 m/m ³	
진동 최대값	측정위치	240 m	16.9% 감소
	진동값	0.230 cm/sec	
	발생지점	확대부	
소음 분석	92.0 dBA	96.5 dBA	4.5 dBA 감소

4.3 OO 철도건설 현장

강원도에 위치한 당 현장의 기반암은 사암 및 석회암으로 원설계에서 Type I,II,III에서는 Cylinder-Cut, Type IV,V에는 V-Cut으로 설정되었다. 표 10과 같이 암반 Type III 구간(굴진장 2.0m)에 대해 V-Cut, Cylinder-Cut, SAV-Cut 발파공법을 각 1회씩 시험 적용하였다. 보조경사공은 V-Cut에만 1단을 적용하였다.

표 10. 시험발파 발파패턴 및 채원

구 분	SAV - Cut	Cylinder - Cut	V - Cut
천공장	2.1m	2.1m	2.1m
심발공수	15공	18공(무장약공 포함)	18공
보조공단수	0	-	1
총공수	135공	142공	140공
총장약량	169.25 kg	170.5 kg	178 kg
천공현황			

적용 결과, 표 11과 같이 발파효율 측면에서 보조경사공이 없었음에도 불구하고 SAV-Cut이 90% 이상으로 가장 우수하며, 발파진동 및 소음 측면에서도 유리함을 확인할 수 있었다.

표 11. 시험발파 적용 결과

구 분		SAV - CUT	Cylinder - CUT	V - CUT
발파효율	천공장	2,100 mm	2,100 mm	2,100 mm
	굴진장	1,910 mm	1,800 mm	1,680 mm
	효 율	91.0 %	85.7 %	80.8 %
비장약량	총장약량	169.25 kg	170.5 kg	178.0 kg
	굴착량	183.00 m ³	172.46 m ³	160.96 m ³
	비장약량	0.925 kg/m ³	0.989 kg/m ³	1.106 kg/m ³
비천공장	총천공장	285.0 m	298.2 m	293.0 m
	굴착량	183.00 m ³	172.46 m ³	160.96 m ³
	비천공장	1.557 m/m ³	1.729 m/m ³	1.820 m/m ³
발파진동 (100m)	지발당 장약량	2.0 kg	2.0 kg	2.5 kg
	진동값	0.399 cm/sec	0.280 cm/sec	0.630 cm/sec
발파소음	측정거리	360 m	365 m	380 m
	소음값	101 dBA	104 dBA	108 dBA

5. SAV-CUT 발파공법의 효과

5.1 굴진효율 증대

V-Cut은 경사공 기폭으로 심발부의 암괴를 자유면 방향으로 전단이동시키는 썩기파괴의 원리를 이용한다. 높은 효율을 위해서는 초기에 공저부 암반을 충분히 파괴시키는 것이 필요하다. 국내에서는 카트리지 화약을 주로 이용하므로 공저부 밀장전이 힘들고 천공오차 발생 시 경사공의 공저부 간격이 벌어지는 현상으로 공저부 파괴가 불충분하게 되어 발파 효율이 저하되는 현상이 발생한다. SAV-Cut은 이러한 문제점을 중앙공의 메커니즘을 통해 해결하였다. 중앙공 선기폭으로 공저부 암반을 약화시킨 후 경사공을 기폭함으로써 충분한 공저부 파괴가 가능하여 파괴효율을 증대시킬 수 있다. SAV-Cut의 이러한 효과는 PFC2D 수치해석과 실제 현장의 다양한 암반 Type에의 적용 결과를 통해 검증되었다.

5.2 발파진동 저감

본 신기술인 SAV-Cut의 공학적 원리는 중앙공 선기폭을 통해 공저부 암반을 약화시킴으로써 발파계수를 저감시켜 경사공 기폭 시 적은 에너지로도 충분한 공저부 파괴가 가능하도록 하는 것이다. 따라서 최적 장약량은 V-Cut에 비해 줄어들게 되어 국내 화약의 제한으로 충분히 최적 장약량을 만족시킬 수 있음과 동시에 발파에 의한 진동과 소음을 저감시키는 것이 가능하다.

실제 현장에 적용한 사례에서 기존발파(V-Cut)와 신기술(SAV-Cut)에 의한 발파진동 이력 곡선을 분석하면 표 12와 같이 V-Cut은 심발부에서, SAV-Cut에서는 중앙공 선기폭 효과에 의해 확대부 영역에서 발파진동 최대값이 발생하는 것을 확인할 수 있다

표 12. 발파공법별 발파진동 최대값 발생영역 비교 (OO 국도건설 현장)

발파공법별	진동이력곡선 분석	최대진동 발생지점
V - Cut		심발부 영역
SAV - Cut		확대부 영역

5.3 시공성 개선

시공의 특성 상 공법의 메커니즘과는 별개로 공법의 시공성이 기술의 정착 단계에서 중요한 역할을 하게 된다. SAV-Cut은 시공성이 가장 편리한 V-Cut에 기반을 두어 개발되어 기존 공법들에 비해 시공성이 용이하다. 표 13은 V-Cut과 SAV-Cut과의 시공성 비교분석 내용이다.

표 13. V-Cut과 SAV-Cut의 시공성 비교

구분	SAV-Cut	V-Cut
특징	<ul style="list-style-type: none"> 경사공과 같은 열 상에 중앙공 설치 주경사공 각도 70° 내외 공저부 간격 30 cm 정도 2.0m를 최소저항선으로 하여 보조경사공 설치 보조경사공 위치에 맞춰 중앙공 분할장약(암질에 따라 분할장약 생략 가능) 	<ul style="list-style-type: none"> 경사공으로 구성 주경사공 각도 약 60° 공저부 간격을 최대한 좁게 시공 1.5m를 최소저항선으로 하여 보조경사공 설치 경사공 기저장약밀도 증대
장점	<ul style="list-style-type: none"> 중앙공 선기폭으로 공저부 파괴 효과 증대 및 천공오차에 의한 영향 최소화로 지속적인 고효율 경사공 장약량 감소로 발파진동 저감 인접 경사공 수 감소 보조경사공 수 감소 	<ul style="list-style-type: none"> 원리와 시공이 가장 간단 정확한 천공 시 고효율
단점	<ul style="list-style-type: none"> 중앙공 천공 및 분할장약 시공(암질에 따라 분할장약 생략 가능) 	<ul style="list-style-type: none"> 천공 오차 시 효율 저하 공저부 디커플링으로 효율 저하

5.4 경제성 향상

실제 현장에 적용한 사례에서 굴진효율에 따른 단가를 비교하면 표 14와 같이 SAV-Cut이 가장 유리한 것으로 분석되었다. 동일효율을 가정하는 경우에는 암질에 따라 SAV-Cut이 V-Cut에 비해 줄어드는 심발부 경사공 장약량과 보조경사공 단수를 산정하여 단가를 결정해야 할 것으로 사료된다.

표 14. 발파공법별 굴진효율에 따른 단가 비교

현장	구분	단위	SAV-Cut	Cylinder-Cut	V-Cut
OO 철도건설공사	굴착단면적	m ²	83.47		
	천공장	m	3.8	3.8	3.8
	총장약량	kg	268.425	279.675	275.175
	보조공 단수	단	1	-	2
	굴진효율	%	92.1	81.5	82.9
	비장약량	kg/m ³	0.918	1.080	1.046
	단가	원/m ³	9,761	11,254	10,963
OO 국도건설공사	굴착단면적	m ²	82.383		
	천공장	m	3.5	-	3.5
	총장약량	kg	265.0	-	269.5
	보조공 단수	단	1	-	1
	굴진효율	%	95.7	-	91.4
	비장약량	kg/m ³	0.950	-	1.011
	단가	원/m ³	10,557	-	10,942
OO 철도건설공사	굴착단면적	m ²	95.814		
	천공장	m	2.1	2.1	2.1
	총장약량	kg	169.25	170.5	178
	보조공 단수	단	0	-	1
	굴진효율	%	91.0	85.7	80.8
	비장약량	kg/m ³	0.925	0.989	1.106
	단가	원/m ³	11,697	12,716	13,664

6. 결론

1) 국내 대부분의 현장에서 심발발파공법으로 V-Cut을 적용하고 있으나, 고효율을 달성하기 위해서는 공저부의 충분한 파괴가 전제되어야 한다. 그렇지만, V-Cut에서는 공저부 장약의 디커플링 효과와 천공오차에 의해 공저부가 충분히 파괴되지 않아 발파효율이 저하될 수 있다. SAV-Cut은 V-Cut의 2가지 문제점을 해결하기 위해 중앙공의 메커니즘을 적용하였고, 중앙공 선기폭 후 경사공 기폭 시스템으로 굴진효율의 증가와 발파에 의한 진동 감소효과를 기대할 수 있다.

2) PFC2D 수치해석을 통해 SAV-Cut이 V-Cut에 비해 공저부 파괴율이 Type IV의 경우 12%, Type I에서는 47% 증가하였고, 최대발파진동속도는 Type IV에서 16~51%, Type I에서는 24~39% 작게 발생하는 것을 검증하였다.

- 3) 현장적용사례를 통해 SAV-Cut이 V-Cut, Cylinder-Cut에 비해 굴진효율과 발파 진동 및 소음 측면에서 우수함을 검증하였다.
- 4) 기존 V-Cut의 경사공과 같은 열 상에 중앙공을 설치하는 것으로 설계와 시공성 측면에서 간단하며, 중앙공 메커니즘을 통해 경사각과 공저부 간격의 완화, 인접경사공 수와 보조 경사공 수, 장약량 절감 등을 통해 원가절감의 효과를 얻을 수 있다.
- 5) 향후 보다 다양한 암질조건에서 SAV-Cut의 성능을 검증하고, 중앙공 선기폭에 의한 영향을 정량적으로 분석하는 연구가 추가적으로 이루어져야할 것으로 사료된다.

참고문헌

1. 기경철, 김일중, 2002, 산학인을 위한 발파공학, 동화기술, 서울, pp. 36-39.
2. 박의섭, 류창하, 2005, PFC2D를 이용한 절리암반의 역학적 물성 평가연구, 터널과 지하공간 (한국암반공학회지), Vol. 15, No. 2, pp. 119-128.
3. 이희근, 임한욱, 1997, 터널·지하공간 굴착공학, 구미서관, pp. 83-85.
4. 한국도로공사, 2000, 여굴최소화를 위한 최적 발파패턴 설계방안에 관한 연구, pp. 71-73.
5. 화약학회(일본), 2001, 발파공학 핸드북, pp. 237.
6. Atlas Powder Company, 1987, Explosives and rock blasting, pp. 662.
7. Jong, Y.H., Lee, C.I., Jeon, S., Cho, Y.D. & Shim, D.S. 2005. Numerical modeling of the circular-cut using particle flow code, Proc. of the 31st Annual Conference of Explosives and Blasting Technique, Orlando, CO, USA : CD-ROM.
8. Kim, J. H., 2000, The circular center cut with large empty hole and pre-splitting in tunnel, Master's thesis of Kangwon National University, Korea.
9. Gustafsson, R., 1981, Blasting Technique, Dynamit Nobel Wien, pp. 144-167.
10. Olofsson, S.O., 1988, Applied Explosives Technology, pp. 148.