

다자유면을 이용한 터널 굴착방법에 관한 연구

지원섭¹⁾ · 이천식²⁾ · 강대우³⁾ · 기경철⁴⁾

1. 서론

최근 산업발달과 도시의 성장 등으로 기반시설 확충을 위한 건설공사가 증가하면서 민가 혹은 기타 건축물에 인접하여 발파공사가 실시되는 경우가 많아지고 있다.

발파에 의한 굴착이 기계굴착 및 타공법에 비하여 비용이 저렴하고 굴착속도가 빠르기 때문에 널리 사용되고 있으나, 화약류를 사용하기 때문에 지반진동 및 폭발압 등의 발파공해를 유발하며 이에 의해 주변 구조물이나 시설물에 피해가 발생하기도 하여 진동 및 소음 등의 발파공해의 억제가 요구되는 시가지나 도심지 적용에 어려움이 있으며, 미진동, 무진동 굴착공법 등의 비발파 공법은 고비용, 작업효율 저하, 공기 증가, 2차적 공해유발 등으로 선별적으로 적용되고 있는 실정이다.

다자유면을 이용한 암반굴착 공법은 진동, 소음 억제가 요구되는 시가지나 구조물에 근접한 발파작업 시 현장 주위의 주변건물 등에 발파진동이 그대로 전달되는 것을 사전에 차단하기 위하여, 연속천공기에 의해 필요개소에 인공적인 절단면을 먼저 형성하여 진동의 전파를 차단하고, 이를 자유면으로 활용함으로써 발파 시 발생하는 지반진동 등의 발파공해를 효과적으로 제어하고, 발파충격파에 의한 벽면암반의 손상을 방지하여 시공성을 극대화할 수 있도록 한 공법이다.

본 논문에서는 기존의 암반굴착공법의 문제점을 개선하고 시공성을 극대화시킨 효율적인 암반굴착공법인 다자유면을 이용한 터널굴착 공법에 대하여 소개하고자 한다.

2. 공법의 원리 및 특징

2.1 기존 터널발파 공법의 특징

터널 발파는 계단식 노천발파와는 달리 대부분 단일 자유면이기 때문에 새로운 자유면을 형성하기 위하여 심빼기 발파를 하게 된다.

그림 1은 일반적인 기존 터널발파의 발공 배치 및 발파단계를 나타낸 것으로 터널의 막장 중심 하단부에 심발공을, 순차적으로 확대공, 굴착선 전열공, 굴착선공(외곽공 또는 바닥공)을 배치하며, 심발부 발파에 의해 1차적으로 자유면을 형성하고 후속 발파공들에 의해 자유

1) 계림하이텍(주) 대표
2) 네스트 ENG 대표
3) 동아대학교 자원공학과 교수
4) 산업인력공단

면을 확대하여 발파하는 방법으로 심발공과 심발확대공의 발파단계가 전체적인 발파의 성공 여부를 좌우하게 되므로 일반적으로 심발공은 다른 장약공들에 비하여 다소 과장약으로 장전하게 되며 따라서, 발파진동은 전체 발파작업에서 대부분 심발부에서 발파진동의 크기도 증대되며 초기진동의 원인이 되기도 한다.

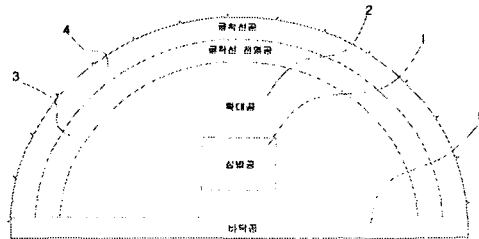


그림 1. 터널공 배치 및 발파 단계

그러므로 초기진동 억제 및 발파 진동의 크기를 저감시키기 위하여 장약량 분산, 자유면 증대 등의 목적으로 기폭되는 동일 단차의 뇌관수를 늘리고 인위적인 자유면을 형성시키기 위하여 대공경의 무장약을 설치하기도 한다.

현재 국내에서 터널발파 작업 시 사용되는 터널 발파방법은 심발발파의 발파패턴에 따라 구분되거나 기폭방법에 따라 구분한다.

발파방법 중 가장 오래되고 가장 널리 사용되는 공법으로 심빼기공에 일정 각도를 주는 V-cut 심빼기, 심빼기 부분을 포함하여 전체공을 수평으로 천공하며 장약공과 무장약동의 크기가 동일한 Burn-cut 심빼기, Burn-cut과 동일하게 수평상태로 천공을 하며 발파공 보다 무장약공의 직경을 크게 천공하는 Cylinder-cut 심빼기, PLHBM-cut(Φ360-450(mm)의 대구경), 수평천공과 경사천공을 함께 이용하는 Supex-cut, SAV-cut 등이 있다.

이들 터널발파공법들은 발파효율을 극대화하기 위해 각각의 장단점을 가지고 있으므로 현장에서는 발파조건에 따라 안전성, 경제성 등을 고려한 공법을 채택하여야 한다.

표 1. 터널 심발발파 공법의 비교

구분	경사공 심발		평행공 심발		PLHBM	Supex-cut	다자유면
	V-cut	Double V-cut	Burn cut	Cylinder cut			
공법 개요	가장 오랜 공법으로 중심선 기준 대칭으로 60~70°로 천공	V-cut와 동일하나심빼기 신뢰성 증진을 위해 소규모 cut추가	동일 구경의 무장약공 및 장약공을 자유면에 수직천공	Burn-cut에서 진보된 공법으로 무장약공을 대구경으로 천공	Cylinder-cut에서 진보된 공법으로중앙에 대구경 천공	V-cut와 Burn-cut를 결합한 형태로 Cylinder cut에 비해 천공효율 우수	연속천공에 의해 인공 절단면을 형성하여 3자유면 이상의 다자유면을 형성한 후 발파하는 방법
개요도							
최소 자유면	1 자유면	1 자유면	2 자유면	자유면	2 자유면	1~2 자유면	5자유면

표 1은 터널발파에 적용되고 있는 심발공법을 비교한 것으로 다자유면을 제외한 대부분의 심발공법은 최초 1-2자유면 상태이다.

2.2 다자유면 굴착공법의 원리 및 특징

발파에 의한 기존 터널 굴착법은 상기의 설명한 심발법으로 심발부 발파에 의해 1차적으로 자유면을 형성하고 후속 발파공들에 의해 순차적으로 자유면을 확대하여 발파하는 방법으로 심발공과 심발확대공의 발파단계가 전체적인 발파의 성공여부를 좌우하게 되므로 일반적으로 심발공은 확대공들에 비하여 다소 과장약으로 장전하게 되며 따라서, 발파진동은 전체 발파작업에서 대부분 심발부에서 가장 크게 발생하게 된다. 따라서, 진동, 소음 억제가 요구되는 시가지나 구조물에 근접한 지역에서 실시되는 발파작업시 무장약공 천공, 라인드릴링, 보조심발, 다단발파, 비전기식 발파 등의 진동제어공법을 이용하여 발파하더라도 발파진동을 효과적으로 차단하는데 한계가 있었다.

다자유면 천공에 의한 발파법은 도심지 및 시가지 구조물 인근에서 발파할 경우, 현장 주위의 주변건물에 발파진동이 그대로 전달되는 것을 사전에 차단하기 위하여, 터널 막장면 특정 부분(심발부 또는 굴착선부) 또는 진동전파 경로상의 특정부분에 연속천공에 의해 인공 절단면을 형성하고 이를 신자유면으로 활용하여 발파하는 방법으로 방진구 역할을 하는 상기의 절단면을 통해 진동을 차단하고 3자유면 이상의 다자유면을 형성한 후 발파를 하므로 기존의 높은 비장약으로 발파하는 심발발파법과는 달리 최소의 장약량으로 심발발파를 시행하므로 발파시 발생하는 진동 및 소음을 크게 감소시킬 수 있으며, 선절단에 의한 굴착작업으로 굴착선의 여굴 및 과굴이 전혀 발생되지 않는 공법으로 터널 및 노천에 공히 적용될 수 있다.

다자유면은 크게 외곽부 및 심발부에 형성하는 방법과 심발부에만 형성하는 방법있으며 그림 2는 다자유면을 이용한 저공해 터널굴착공법의 대표도면으로 그림 2(a)는 외곽부 및 심발부에 다자유면을 형성한 것이고, 그림 2(b)는 심발부에만 다자유면을 형성한 것이다. 심발부 다자유면의 형태는 막장면 중심 하단부로부터 일정 높이에 종방향 또는 횡방향, 사각형, 원형 등의 여러 가지 형태를 이룰 수 있다.

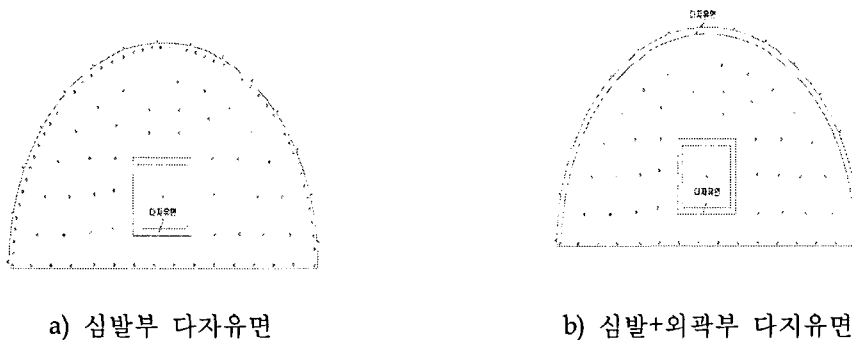
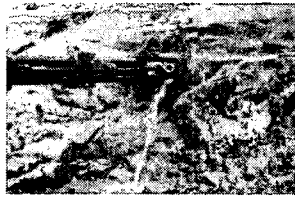


그림 2. 다자유면을 이용한 터널발파

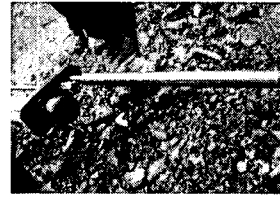
2.3 공법의 특징

다자유면공법의 시공순서는 $\varnothing 55\sim 110(\text{mm})$ 정도의 기준공 천공, 특수 제작된 가이드를 드릴에 조립, 기준공 내 가이드 삽입하여 반복하여 연속 다자유면 천공, 일반적인 장약공 천공, 장약 및 발파의 순으로 진행된다.

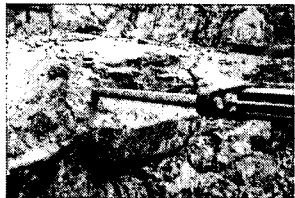
그림 3은 본 공법의 시공 순서를 나타낸 것이다.



a) 기준공 천공



b) 가이드 조립



c) 가이드 삽입



d) 연속 다자유면 천공

그림 3. 다자유면 시공 순서

천공

본 암반굴착 공법은 먼저 다자유면 연속천공을 하고자 하는 소정의 위치에 기준이 되는 공을 먼저 천공한다. 이때 천공직경은 $\varnothing 55\sim 110(\text{mm})$ 정도로 발파공 깊이보다 깊게 천공하여 발파시 구속력을 최소화하여 진동감소 및 굴진효율을 증대시킬 수 있도록 한다.

장약 및 기폭방법

장약 및 기폭은 기존의 발파방법과 동일하며 터널의 경우 심발공에 의한 자유면 형성 및 심발확대공에 의한 자유면 확대, 순차적으로 확대공, 굴착선 전열공, 바닥공의 순으로 기폭시키는 것이 일상적이다. 그러나, 다자유면에 의한 암반굴착공법은 연속 천공에 의해 굴착선공이 사전 절단되므로 굴착선부 장약 및 기폭은 하지 않으며 터널의 경우 연속천공에 의한 다자유면 확보로 심발부 암반의 구속력을 최소화하여 발파함으로써 기존 발파공보다 훨씬 적은 약량으로 발파가 가능하다.


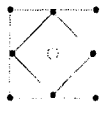
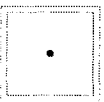
단위 천공수 및 비장약량 비교

동일 설계조건에서 심발발파 비교 시 기존 V-cut 및 Cylinder-cut 대비 다자유면 발파시

의 단위면적당 천공수 및 비장약량이 현저하게 감소됨을 알 수 있다.

표 2는 동일 조건에서 기존 심발공법과 다자유면 공법 적용시의 상세 발파제원을 비교한 것이다.

표 2. 심발공법 제원 비교

구 분	V-cut	Cylinder-cut	다자유면
개요도			
천공장(m)	1.3	1.3	1.3
공당/지발당장약량(kg)	0.375	0.375	0.375
천공수(공)	8	8	1
총장약량(kg)	3.000	3.000	0.375
단위면적당 천공수(공/m ²)	10.25	32.00	0.69
비장약량(kg/m ³)	3.205	10.000	0.217
비천공수(공/m ³)	8.547	26.667	0.579

3. 현장 시험

다자유면을 이용한 발파공법의 실용성을 확인하기 위하여 ○○현장에서 적용 시험을 실시하였다. 실험 방법은 동일한 현장에서 동일조건으로 기존 발파공법과 다자유면 발파공법을 실시하고 진동감소효과 및 발파효율 등을 비교 분석하였다.

3.1 연구대상지 지질 및 암석 물성

그림 4는 연구대상지역의 지질도로 본 지역은 한반도의 동남측에 위치하고 본 지역의 기반암은 주산 안산암질암으로 암회색, 연회색의 세립질 암으로 감섬석, 휘석, 장석 등 반정을 갖는 반상구조를 이루기도 한다.

표 3은 대상지역에서 채취된 암석시료(Intact Rock)를 대상으로 암석의 역학적 특성파악을 위해 일축압축강도, 탄성계수 및 포아송비, 탄성과 속도, 인장강도 등의 암석시험을 실시한 결과로 연구대상 암반은 절리가 발달된 극경암으로 판명되었다.

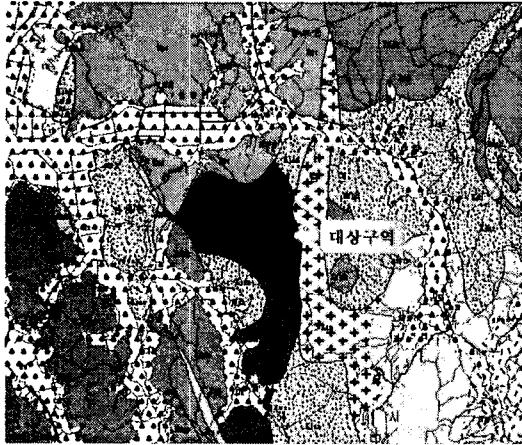


그림 4. 연구대상지역 지질현황

표 3. 현장 암석 실내 시험 결과

구 분	샘플1	샘플2	비고
비중(g/cm ³)	2.56	2.75	
압축강도(kg/cm ²)	1,980	2,560	
인장강도(kg/cm ²)	132	186	
영률(10 ⁵ kg/cm ²)	9.8	12.6	
포이슨 비(v)	0.25	0.29	
P파 속도(km/sec)	4.56	5.26	

3.2 시험 및 계측방법

시험은 심발발파 및 터널발파를 비교하였으며 표 4는 각 발파 패턴별 상세 제원을 나타낸 것이다.

발파에 의한 지반진동의 측정은 변위, 속도, 가속도, 주파수 측정 및 발파로 인하여 발생되는 3개 방향 성분(진행, 접선, 수직)의 진동속도를 측정할 수 있는 Canada Instanetel사의 Blastmate II, Minimate Plus를 사용하였다.

계측기 배치는 발파지점을 직상부 후방으로 5~20(m) 간격으로 환산거리를 달리하여 측정을 실시하였다.

표 4. 시험 패턴 비교

구 분	심발 발파			터널 발파	
	V-Cut	Cylinder-Cut	다자유면 발파	V-Cut 발파	다자유면 발파
발파 패턴					
천공경	∅45mm(발파공)	∅102mm(무장약공) ∅45mm(발파공)	∅90mm(다자유면) ∅45mm(발파공)	∅45mm(발파공)	∅90mm(다자유면) ∅45mm(발파공)
천공장	1.3m	1.3m	1.3m	1.3m	1.3m
지발당 장약량	0.375kg	0.375kg	0.375kg	0.5kg	0.5kg

4. 시험 결과

심발발파와 터널발파를 분리하여 진동속도, 파형분석, 발파효율 등을 비교하였다.

4.1 진동 비교

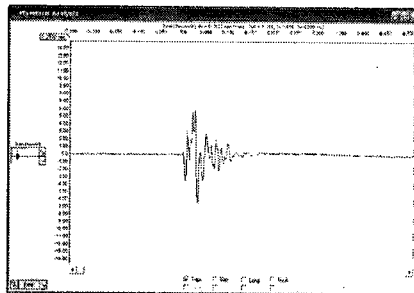
표 5는 동일계측 지점에서 각 발파에 따른 진동최고치(PPV)를 비교한 결과이며, 심발발파의 경우 V-Cut 발파대비 평균 약 60%, Cylinder-Cut 발파대비 다자유면 발파시 평균 약 65%의 진동감소효과가 있는 것으로 확인되었으며, 터널발파의 경우 기존 V-Cut에 의한 발파보다 다자유면을 이용한 발파 시 진동감소 효과는 평균 약 50% 정도 감소효과가 있는 것으로 확인되었다.

표 5. 시험발파 계측 결과

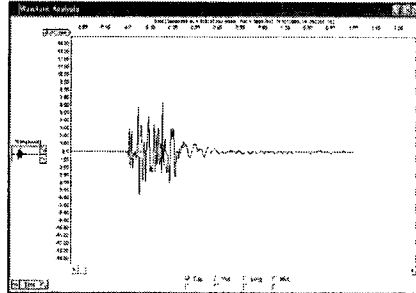
거리 (m)	심발발파			터널발파	
	V-cut	Cylinder-cut	다자유면	V-cut	다자유면
15	0.682	0.645	0.256	0.856	0.428
20	0.595	0.584	0.215	0.812	0.362
25	0.512	0.485	0.182	0.675	0.314
30	0.428	0.447	0.165	0.497	0.257
35	0.352	0.364	0.125	0.382	0.215
40	0.265	0.254	0.114	0.304	0.156
60	0.125	0.112	0.048	0.148	0.072
70	0.086	0.074	0.032	0.115	0.054
진동전파 에너지	100%	105%	40%	100%	50%

4.2 진동 파형 비교

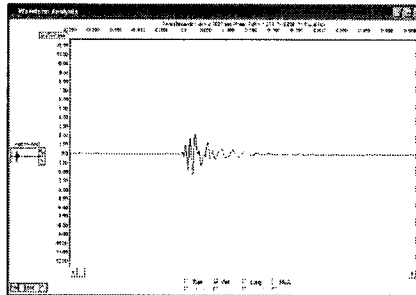
그림 5는 기존 일반터널발파와 다자유면 발파의 진동파형을 비교한 것이다.



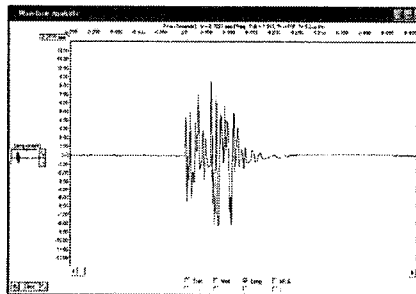
(a) V-cut 발파 (심발)



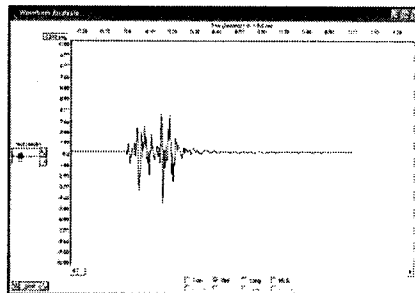
(b) cylinder-cut 발파 (심발)



(c) 다자유면 발파 (심발)



(d) V-cut (터널)



(e) 다자유면 발파 (터널)

그림 5. 진동 파형 비교

4.3 발파 전·후 현황

그림 6은 다자유면 발파 시 발파전 상태와 발파 후 상태를 비교한 것으로 다자유면 발파 시 굴착선 후방 암반손상은 전혀 나타나지 않는 것으로 확인되었다.



(a) 발파 전 현황

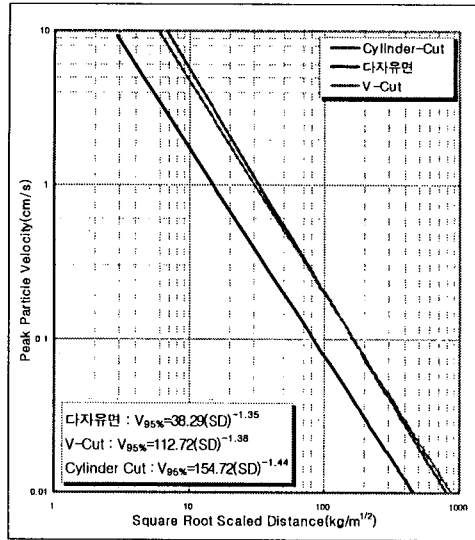


(b) 발파 후 현황

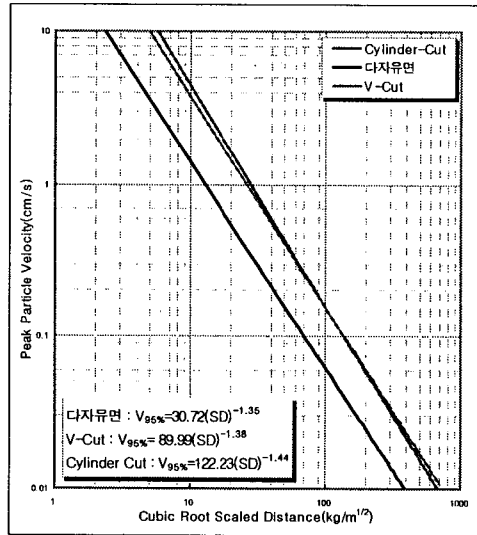
그림 6. 발파전·후 결과비교

4.4 진동 추정식 비교

시험발파에 의해 계측된 진동 계측 결과 값을 적용하여 해당 공법별 진동 감쇠특성을 정량적으로 해석하기 위해 회귀분석(Regression Analysis)을 실시하였으며 그림 7, 8은 심발 및 터널발파의 진동추정식을 나타낸 것으로 동일 환산거리에서 진동은 기존발파에 비해 다자유면 발파 시 현저히 감소됨을 알 수 있다.

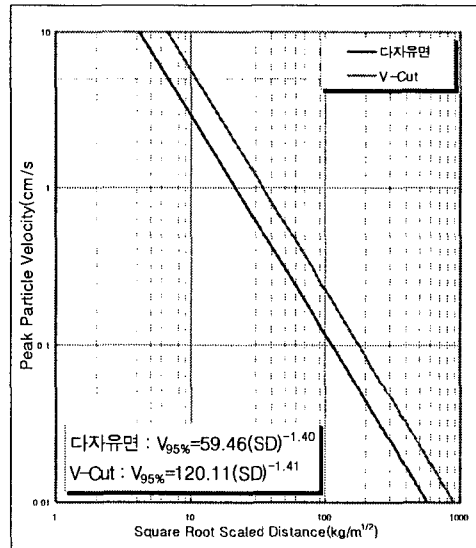


(a) 자승근 환산식

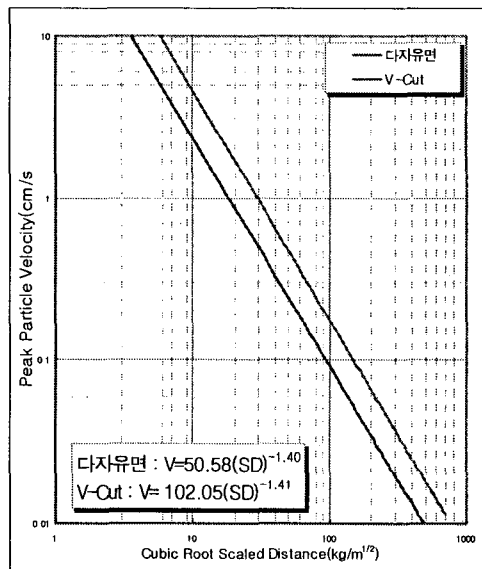


(b) 삼승근 환산식

그림 7. 심발발파 진동추정식 비교



(a) 자승근 환산식



(b) 삼승근 환산식

그림 8. 터널발파 진동추정식 비교

심발발파 분석결과 자승근 적용시 V-cut 발파의 경우 $K=112.72$, $n=-1.44$, Cylinder-cut의 경우 $K=154.72$, $n=-1.38$, 다자유면 발파의 경우 $K=38.29$, $n=-1.35$, 삼승근 적용시 V-cut 발파의 경우 $K=89.99$, $n=-1.44$, Cylinder-cut의 경우 $K=122.28$, $n=-1.38$, 다자유면 발파의 경우

K=30.72, n=-1.35로 나타났다.

터널발파 분석결과 자승근 적용시 V-cut 발파의 경우 K=120.11, n=-1.41, 다자유면 발파의 경우 K=59.46, n=-1.40, 삼승근 적용시 V-cut 발파의 경우 K=102.05, n=-1.41, 다자유면 발파의 경우 K=50.58, n=-1.40로 나타났다.

5. 현장 적용 시험

다자유면을 이용한 터널 발파공법의 현장 적용성을 확인하기 위하여 2007년 ○○월 ○○일 매우강한 강도의 편마암으로 이루어진 ○○철도 ○공구 터널현장에서 기존 설계의 V-cut 발파패턴과 비교 시험을 실시하였으며 상세한 발파제원은 표 6과 같다.

표 6. 시험발파 패턴 비교

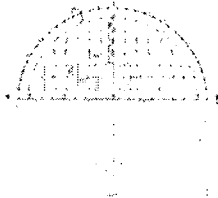
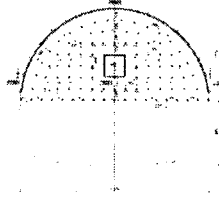
구 분	V- Cut	다자유면
발파 패턴도		
천공장	1.3m	1.3m
발파공수	132공	93공
지발당 장약량	1.125kg	1.125kg

그림 9는 터널 막장면에서 연속천공에 의한 다자유면을 형성하고 있는 그림으로 그림 9(a)는 심발부 다자유면, 그림 9(b)는 외곽부에 다자유면을 형성하는 광경이다.



(a) 심발부 다자유면 형성



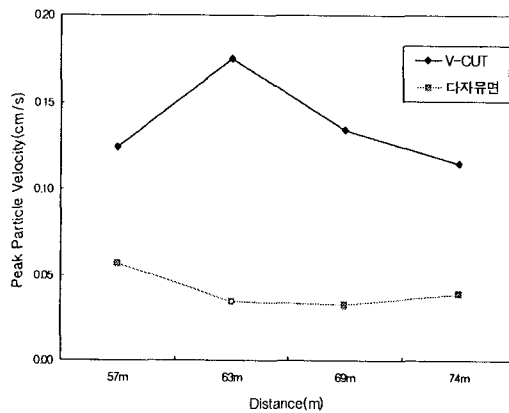
(b) 외곽부 다자유면 형성

그림 9. 다자유면 형성 광경

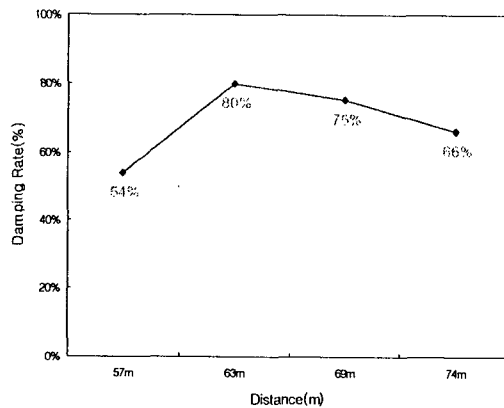
표 7 및 그림 10은 V-cut 발파패턴과 다자유면을 이용한 발파의 비교시험 결과를 나타낸 것으로 V-cut 대비 다자유면을 이용한 발파 시 최소 54% 이상의 진동감소효과를 나타내었다.

표 7. 시험발파 계측 결과

거리 (m)	계측결과(cm/sec)		진동 감소율
	V-CUT	다자유면	
57	0.124	0.057	54%
63	0.175	0.035	80%
69	0.134	0.033	75%
74	0.115	0.039	66%



(a) 진동 측정 결과 비교



(b) 측정별 진동 감소 효과

그림 10. 시험발파 결과 비교

6. 결 론

본 연구에서는 암반 굴착을 위한 연속 다자유면공법과 기존 발파공법 비교 시험한 결과 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

1. 동일 설계조건에서 심발발파 비교 시 기존 V-cut 및 Cylinder-cut 대비 다자유면 발파시의 단위면적당 천공수 및 비장약량 등이 현저하게 감소됨으로써 기존 발파에 비해 진동을 저감시킬 수 있다.
2. 심발발파 비교 시 기존 터널 심발발파인 실린더컷 대비 다자유면을 이용한 심발발파시 진동감소효과는 평균 약 60%의 진동감소 효과를 나타내며 심발에만 다자유면을 적용할 경우 진동제어에 상당한 효과를 기대할 수 있을 것으로 예상된다.
3. 터널발파 비교 시 기존 V-Cut에 의한 터널 발파와 다자유면을 이용한 터널발파시 진동감소효과는 평균 약 50%의 진동감소 효과를 나타낸다.
4. 기존 발파 시 발파충격파에 의한 벽면암반의 손상을 초래하나 다자유면 발파시 굴착 예정선상에 절단함으로써 벽면암반의 손상이 없으며 여굴량도 크게 감소된다.
5. ○○철도 ○공구 터널현장에서 기존 설계의 V-cut 발파패턴과 비교 시험을 실시한 결과 V-cut 대비 다자유면을 이용한 발파 시 최소 54% 이상의 진동감소효과를 나타내었다.
6. 보안물건 근접 암반 굴착 시 다자유면을 이용한 굴착공법 적용 시 굴착 예정선 또는 진동제어가 요구되는 지점에 연속천공기에 의해 필요개소에 인공 절단면을 미리 형성하여 발파진동의 전파를 차단하고, 이를 신자유면으로 활용하여 발파하면 발파 시 발생하는 소음 및 지반진동 등의 발파공해를 효과적으로 제어할 수 있으며 발파충격파에 의한 벽면암반의 손상을 방지하여 공사의 안전성 및 시공성을 극대화할 수 있을 것으로 기대되며, 향후 지속적인 연구가 따라야 할 것으로 판단된다.

참고문헌

1. Dowding, C.H., 1985, Blasting Vibration Monitoring and Control.
2. (주)대우엔지니어링 기술연구소, 1989, 건설진동의 영향평가 및 대책에 관한 연구(II).
3. 대한주택공사, 1992, 택지조성에서의 암발파 진동저감 방안연구.
4. 한국지반공학회, 1997, 진동 및 내진설계, 구미서관.
5. 원기술, 1998, 발파진동의 주변에의 영향과 대책, 원기술.
6. 건설교통부, 2000, 진동전파차단을 위한 방진벽 채움재의 개발.
7. 조상호, 양형식, 2000, 한국암반공학회, 방진공에 의한 발파진동차단효과의 실험 및 수치 해석적 연구.
8. 심동수, 강대우, 2004, 안산암, 화강암, 화강편마암에서의 NPS 발파법의 진동감쇠효과에 관한 연구, 대한화약발파공학회지, Vol. 22, No. 2.