

강사: 민 형 동 (Hyung-Dong Min)

(주)한화 화약기술팀장

화약류관리기술사

E-mail: hyung777@hanwha.co.kr

미진동 파쇄기의 현장 적용에 관한 연구

미진동 파쇄기의 현장 적용에 관한 연구 A case study of application Finecker Plus in field

민형동¹, 이윤재², 송영석³, 권오성⁴, 박윤석⁵

Hyung-Dong Min, Yun-Jae Lee, Young-Seok Song, O-Sung Kwon, Yun-Seok Park

¹팀장, (주)한화 화약기술팀(hyung777@hanwha.co.kr)

²과장, (주)한화 화약기술팀(leefox@hanwha.co.kr)

³대리, (주)한화 화약기술팀(gaia1030@hanwha.co.kr)

⁴대리, (주)한화 화약기술팀(fivestar@hanwha.co.kr)

⁵사원, (주)한화 화약기술팀(parkys@hanwha.co.kr)

초록: 소음진동 규제법의 강화, 각종 건설민원 발생 및 안전강화 관리 차원에서 현재 국내 터파기 현장 및 각종 토공사에서 종래 시행되어지던 발파공법만으로 시행하는 것은 곤란하다. 건설교통부 설계 지침에서도 진동 규제치의 차이를 두어 파쇄와 발파와의 차이를 확연히 구분하는 실정이다. 기존에 발파는 그 경험이 많아 효과적인 방법 등이 널리 알려져 있지만 파쇄의 경우는 그 시공사례가 많지 않아 그 연구의 필요성이 대두되고 있다. 본 연구는 건교부에서 제시한 암파쇄굴착공법에 사용되어지는 미진동파쇄기에 대한 연구로써 연암, 보통암, 경암지역에서의 전색제, 적정 패턴, 진동 특성 등을 분석하는데 그 목적이 있다. 시험은 크게 1, 2 타입으로 구분하여 실시하였으며 1타입의 경우는 천공장이 1.5 m(180 g 장약)이고, 2타입의 경우는 2.5 m(360 g)이다. 두 패턴을 기본으로 저항선, 공간격을 달리하여 시험을 진행하면서 그에 따르는 진동 및 파쇄정도의 차이를 관찰할 수 있었으며 암석 강도별 예상 진동식을 제안하였다.





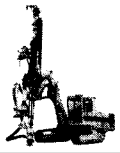
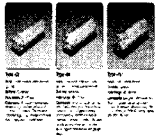

1. 서론

국내의 지질 특성상 각종 터파기 공사에서 암석 굴착 작업은 필수적이다. 암석 굴착의 방법에는 여러 가지 종류가 있으나 가장 널리 사용되는 작업은 발파작업이다. 발파작업은 화약류를 사용하는 작업의 총칭으로 발파작업이 실시되는 작업현장은 깊은 산속에서부터 건물이 밀집하는 도시지역까지 위치하게 되며 발파 작업에 따른 안전과 환경에 미치는 영향은 많이 고려되어 왔다. 특히 보안 물건이 산재되어 있는 도심지의 터파기 경우는 발파 공해가 시간이 지날수록 더욱 더 민감해 지고 있는 부분이다.

도심지 터파기의 경우는 보통 제어 발파를 기본으로 발파 작업을 시행하고 있다. 이는 폭약을 사용하는 것으로 장약량을 줄이거나 발파 방법 등에 그 구분을 둔 것으로 폭약을 사용한다는 것만으로도 민원 야기의 이유가 되고 있다.

건교부에서 제안한 암발파 설계 및 시험발파 잠정지침(안)(2003년 개정)에서도 파쇄와 발파를 확연히 구분하고 있으며 파쇄는 미진동 파쇄기, 플라즈마 등을 사용하고, 발파는 일반 폭약을 사용하는 것으로 명시하고 있다. 또한 각 방법에 대해서 진동 규제치를 제시한다. 도심지 발파의 경우는 건교부 개정안으로 검토했을 시 보안물건 및 민원의 영향으로 암파쇄 굴착 부분이 필수적으로 발생한다. 본 연구는 암파쇄 부분에서의 미진동 파쇄기의 사용에 대한 연구로 적합한 발파 패턴과 정확한 사용방법 등을 제안하는데 그 목적이 있다. 건교부에서 제시하고 있는 공법분류 및 특성, 진동규제기준별 적용되는 이격거리는 표 1, 2, 3과 같다.

표 1. 표준발파공법별 분류 기준

구 분	특수발파	제한 발 파			무제한 발파	
	TYPE I 암파쇄굴착공법	TYPE II 정밀진동제어발파	TYPE III·IV 진동제어발파		TYPE V 일반발파	TYPE VI 대규모 발파
공법개요	특수화공품인 “미진동파쇄기”를 사용하는 공법으로 대형 브레이크에 의한 2차 파쇄를 실시하는 공법	소량의 폭약으로 암반에 균열을 발생시킨 후, 대형 브레이크에 의한 2차 파쇄를 실시하는 공법	발파 영향권 내에 보안물건이 존재하는 경우 “시험발파” 결과에 의해 발파 설계를 실시하여 규제 기준을 준수할 수 있는 공법		1공당 최대 장약량이 발파 규제 기준을 충족시킬 수 있을 만큼 보안물건과 이격된 영역에 대해 적용하는 공법	발파 영향권 내에 보안물건이 전혀 존재하지 않는 산간오지 등에서 발파 효율을 높이고 고려하는 공법
사용폭약 및 화공품	미진동파쇄기	에멀전 계열 폭약	에멀전 계열 폭약		에멀전 계열 폭약	주폭약 : 초유폭약 기폭약 : 에멀전
						
천공직경	φ 51mm 이내	φ 51mm 이내	소규모 φ 51mm 이내	중규모 φ 76mm	φ 76mm	φ 76mm 이상
천공장비	 또는 					
	※ 공기압축기식 크로울러 드릴 또는 유압식 크로울러 드릴 선택 사용					
사용 비트						
발파패턴	암파쇄굴착공법	정밀진동제어발파	진동제어발파 소규모 중규모		일반발파	대규모 발파
천공깊이 (m)	1.5	2.0	2.7	3.2	5.7	11.5
최소저항선 (m)	0.7	0.8	1.0	1.4	1.7	2.2
천공간격 (m)	0.7	0.8	1.20	1.6	1.9	2.5
파쇄 정도	균열만 발생 (보통암 이하)	파쇄 + 균열	파쇄 + 균열		파쇄 + 대괴	파쇄 + 대괴
계측관리	필수	필수	필수		선택	불필요
발파보호공	필수	필수	필수		불필요	불필요
2차 파쇄	대형브레이크 적용	대형브레이크 적용	-		-	-

※ 천공깊이, 최소저항선, 천공간격 치수는 평균값이고 공사시행전에는 시험발파에 따라 현장별로 적용할 것.

표 2. 표준발파공법 패턴별 특성

TYPE	명 칭	허용 지발당 장약량 (kg/delay)	발파제원 (m)	천공경 (m/m)	공당파쇄량 (m³)	사 용 폭 약
I	암파쇄굴착공법	0.18	0.7x0.7x1.5	φ51이내	0.637 이내	미진동파쇄기 프라스마등
II	정밀진동제어 발파공법	0.32	0.8x0.8x2.0	φ51이내	1.28	에멀전폭약 (φ25~32mm)
III	진동제어(소규모) 발파공법	1.0	1.0x1.2x2.7	φ51이내	2.88	(φ32mm)
IV	진동제어(중규모) 발파공법	2.0	1.4x1.6x3.2	φ76	5.824	(φ50mm)
V	일반발파	5.0	1.7x1.9x5.7	φ76	15.5	(φ50mm)
VI	대규모발파	20.0	2.2x2.5x11.5	φ76이상	55.0	주폭약: ANFO 기폭약: 에멀전폭약

표 3. 표준발파공법 및 진동규제기준별 적용되는 이격거리 (m)

TYPE	발파공법	V=0.1	0.2	0.3	0.5	1.0	5.0	비 고
I	암파쇄굴착공법	50m까지	40m까지	25m까지	20m까지	-	-	
II	정밀진동제어발파	51~80	41~50	26~40	21~30	20m까지	-	
III	진동제어(소규모)	81~130	51~90	41~70	31~50	21~40	-	
IV	진동제어(중규모)	131~230	91~150	71~120	51~90	41~60	10m까지	
V	일반발파	231~300	151~260	121~200	91~150	61~100	11~40	
VI	대규모발파	-	261m이상	201m이상	151m이상	101m이상	41m이상	

단위 : cm/sec, kine

시험은 일반 발파 현장을 대상으로 시행하였다. 패턴변경 요소는 암석의 역학적인 특성인 일축강도를 기준으로 연암, 보통암, 경암을 구분하여 실시하였다. 강도측정은 추후의 사용의 편리성을 위해 슈미트 해머로 테스트하여 그 반발치로 압축 강도를 환산하여 구분하였다.

일반적으로 미진동 파쇄기에 대한 지식은 과거 (주)한화에서 생산한 구제품에 대해서 알고 있고, 성능 및 규격을 개선한 새로운 미진동 파쇄기에 대한 정보는 일부 학계나 사용자만이 알고 있는 실정이다. 현재 건교부에서 제안한 미진동 파쇄기의 사용에 대한 정보도 과거의 제품을 기준으로 명시하고 있다. 또한 전색의 불편함, 소량의 제품구성에 기인한 장약상의 문제점 등의 이유로 미진동 파쇄기의 사용이 많이 배제되어 왔다. 이런 이유들의 해결 방안을 이번 실험을 통해서 제안하였다.

2. 미진동 파쇄기의 특성

2.1 개요

미진동 파쇄기는 고열 반응에 의한 순간적인 열팽창으로 암석에 균열이 발생하는 원리를 이용한 것으로서 파쇄기 전용의 점화구를 사용하여 파쇄를 하고, 최근 도심지나 보안건물이 있는 곳에서 콘크리트, 암반 및 교각 등을 발파 시 2차 파쇄를 수행하는 것을 전제로 진동, 소음제어와 비산물 방지를 위한 발파현장에서 각광받고 있으며 화공품으로 분류된다.

2.2 원리

콘크리트, 암반, 돌 등의 폭파에 관계된 파괴이론은 크게 동적파괴 이론과 정적파괴이론의 두 가지로 나눌 수 있다. 두 이론 공히 발파에 의한 파괴는 진원지에서의 폭굉압력이 피파괴체의 압축강도보다 크기 때문에 진원지 주변에는 분쇄권이 형성된다. 정적파괴 이론에 의하면 압축 주응력의 방향으로 분쇄권 외곽에서 균열이 일어난다. 반면에 동적파괴 이론에 의하면 충격파의 반사인장과 때문에 균열이 일어난다.

일반적으로 압축 주응력은 저폭속이나 폭연하는 성질이 있는 화약 사용시에의 파괴에 지배적이고, 반사인장과는 고폭속과 고맹도의 폭약 발파 시 지배적이다. 그러므로 정적파괴 이론은 전자, 동적파괴 이론은 후자에 적용 될 수 있다.

미진동 파쇄기는 가스량이 적고, 반응온도가 높으며 반응속도가 늦은 특수한 물질이 사용되며 그 파괴원리는 다른 화약류와 같이 폭굉반응의 충격파에 의한 파괴가 아니라 주로 압축 주응력에 의한 정적 파괴에 근거하고 있다.

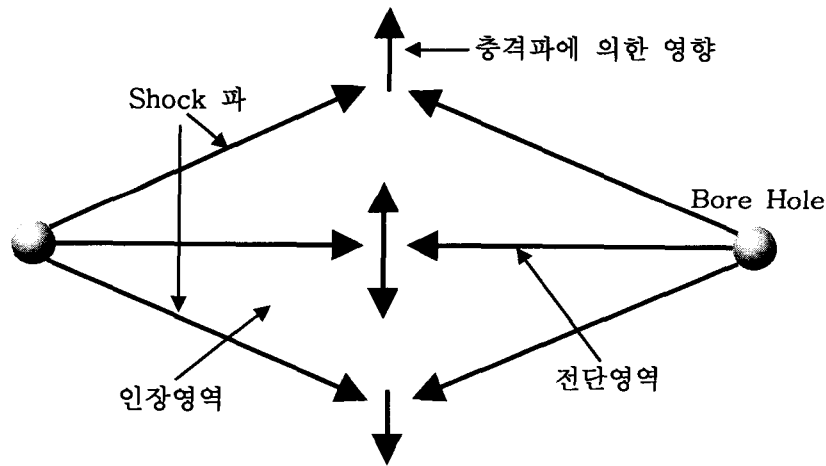


그림 1. 정적파괴 원리

2.3 성능

현재 미진동 파쇄기는 60 g, 180 g으로 생산되고 있으며 그 특성은 아래 표와 같다.

표 4. 미진동 파쇄기의 성능

구 분	연소속도 (m/sec)	반응열 (Kcal/Kg)	가스량 (l/Kg)	낙추감도 (cm)	발화점 ($^{\circ}C$)	경시변화	약상
하이넥카 플러스	100이상	710이상	320	20	440	불변	입상

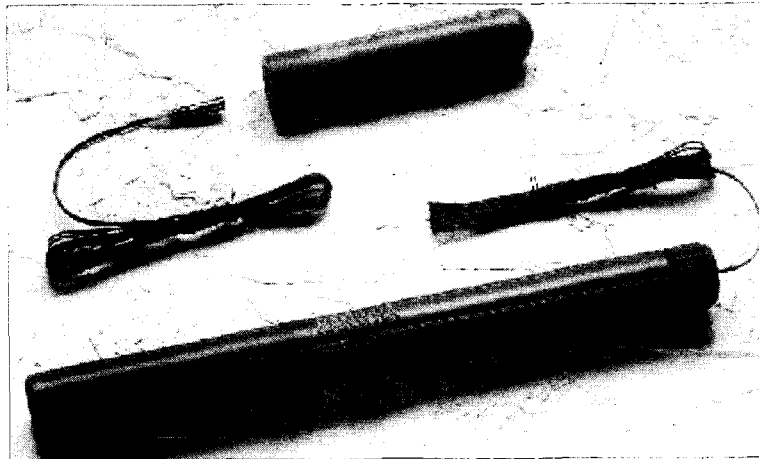


그림 2. 미진동 파쇄기

3. 시험파쇄 진행 Flow

노천 발파의 경우는 널리 알려진 Gustaffson, Langefors식을 기초로 설계가 가능하나, 미진동 파쇄기로 이 식을 적용시켜 패턴을 설정하는 것은 현실성이 없다. 발파 설계식은 대부분 경험식으로 이루어져 있으므로 미진동 파쇄기의 시험 시 그 패턴의 설정은 문헌자료와 과거 시험자료를 근거로 선정하였다.

표 5. 시험 진행 flow

문제 제기	<ul style="list-style-type: none"> ● 소음 및 진동의 규제법 강화, 각종 건설 민원 발생 및 안전관리 강화 ● 폭약을 사용하는 일반 발파의 범위 축소 ● 미진동 파쇄등의 특수 압파쇄 공법의 필요성 대두 ● 미진동 파쇄기의 기본 패턴 및 정확한 사용방법 등의 부재
↓	
과거자료조사	<ul style="list-style-type: none"> ● 문헌조사(개선전의 미진동 파쇄기에 대한 정보) ● 시험내용 검토(개선후의 미진동 파쇄기의 콘트리트 공시체 시험) ● 현장 적용 사례 검토(패턴 및 사용 방법 등의 검토)
↓	
시험패턴 설정	<ul style="list-style-type: none"> ● 과거 자료를 바탕으로 시험 패턴 선정 ● 전색제 및 작업상의 문제점의 평가방안 수립 ● 진동특성 평가를 위한 계측 방법의 수립
↓	
시험 진행	<ul style="list-style-type: none"> ● 1차 시험 : 전용 전색제 및 패턴의 검증(석산) ● 2차 시험 : 전용 전색제 및 패턴의 검증, 폭약과의 진동 특성 비교(석산) ● 3차 시험 : 1,2차 시험 내용의 검증(도로확장 공사) ● 4차 시험 : 1,2,3차 시험 내용의 검증(도심지 터파기 현장)
↓	
결과 도출	<ul style="list-style-type: none"> ● 전용 전색제 및 전색 방법의 제안 ● 연압, 보통압, 경압에서의 기본 패턴정립 ● 암석 강도별 진동의 특성 분석 ● 사용상의 문제점 규명 및 기본적인 사용방법의 제안

4. 미진동 파쇄기 과거 자료 분석

4.1 문헌 조사¹⁾

4.1.1 시공 방법

현재 문헌 등을 통해 널리 알려진 미진동 파쇄기의 사용 방법 중 전색재료는 시멘트, 건조된 모래, 급결제의 비중 비를 1 : 1 : 1 의 비율로 혼합시켜 사용하는 것으로 되어 있으며 여름에는 30분 이상, 겨울에는 60분 이상의 대기시간이 필요하다고 명시되어 있다. 전색 길이는 모르타르의 경우 60cm의 전색 길이를 필요로 하고, 모래와 같은 전색물의 경우는 80cm이상의 전색길이를 요한다. 또한 폭약에 비해 비석은 거의 없지만 철포현상의 발생의 우려가 있다고 알려져 있다.

4.1.2 진동 예측식

구조물이나 시설물의 피해가 발생하지 않도록 안전한 발파를 실시하기 위해 시험발파를 실시해야 한다. 시험발파설계나 시공을 위해 그 동안의 경험에 의한 95% 신뢰 수준을 부여한 식은 다음과 같다.

$$V = 932(R/W^{\frac{1}{2}})^{-2.529} \quad (1)$$

$$V = 958(R/W^{\frac{1}{3}})^{-2.548} \quad (2)$$

$$V = 895R^{-2.515}W^{1.278} \quad (3)$$

여기서 V는 지반진동속도로 단위가 mm/sec이고, R은 폭원과 구조물간의 거리로 단위는 m, W는 1회 제발발파당 장약량으로 단위는 kg이다.

4.1.3 표준 사용량

문헌에 명시된 미진동 파쇄기의 표준 사용을 살펴보면 아래 표3과 같다.

표 6. 문헌에 명시된 미진동 파쇄기의 사용 패턴

구분	P-30 (개/m ³)	P-60 (개/m ³)	P-180 (개/m ³)	비 고
암반 1자유면	-	18	6	V-cut 방식
암반 2자유면(연암)	-	6	2	bench-cut 방식
암반 2자유면(보통암)	-	8	2.5	bench-cut 방식
암반 2자유면(경암)	-	12	4	bench-cut 방식
전석의 소할	4	2	-	-

여기서 P-30: 30 gr/개, P-60: 60 gr/개, P-180: 180 gr/개를 나타낸다. 이를 2자유면의 암반 부분에 대해서 비장약량으로 환산하여 계산하면 연암에서는 0.36 kg/m³, 보통암에서는 0.48 kg/m³, 경암에서는 0.72 kg/m³가 된다.

1) 기경철, 김일중, 2002, 산·학인을 위한 발파공학, 동화기술, 178~180, 327

4.2 기존 연구 결과 분석2)

4.2.1 콘크리트 공시체 시험

제품 개선으로 당사에서 기존에 콘크리트와 현장암반에서 직접 시험을 실시하였다. 구제품과의 성능 비교를 위해 콘크리트 공시체에 시험을 한 결과를 정리하면 다음과 같다.

표 7. 미진동 파쇄기의 콘크리트 공시체 시험결과

구 분	장약량	천공길이	메지방법	파쇄결과
구 미진동파쇄기	30g	40cm	일반모래	철포 발생 및 파쇄 불량
	30g	40cm	EPOXY	파쇄 양호, 비산거리 0.5m
신 미진동파쇄기	30g	40cm	일반모래	파쇄 우수, 비산거리 1.5m
	30g	40cm	EPOXY	파쇄 가장우수, 비산거리 3m

모든 조건을 동일하게 한 콘크리트 공시체 시험결과 개선된 미진동 파쇄기의 경우가 위력이 좋음을 알 수 있다. 이는 파쇄기의 조성변화 차이만으로도 알 수 있는 사실이다. 이 시험 결과로 과거에 미진동 파쇄기에 대한 정보 및 시험결과 등은 현재의 제품에 적용시키는 것은 다소 무리가 있는 것으로 판단된다.



그림 3. 1회 시험파쇄 결과

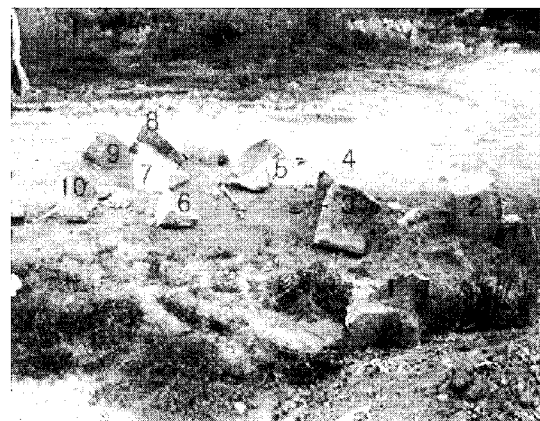


그림 4. 2회 시험파쇄 결과



그림 5. 3회 시험파쇄 결과

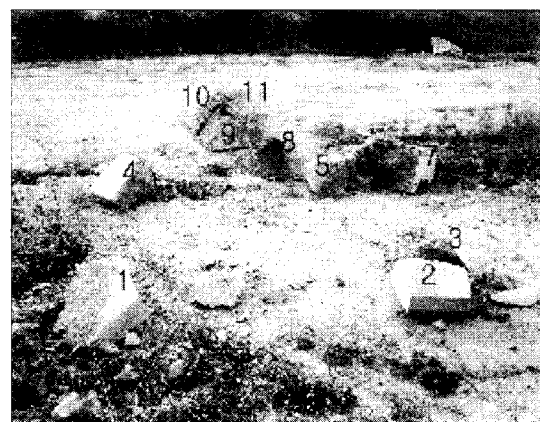


그림 6. 4회 시험파쇄 결과

2) 이천식의 4인, 2001, 뉴 화이테크를 이용한 발파패턴 실용화 방안, 화약·발파, 19(3), 27-37

4.2.2 현장 적용성 시험

실제 공사현장에서 미진동파쇄기의 실용성 여부 및 기존 제품과의 비교를 목적으로 시험을 실시하였다. 시험은 총 4회로 4개의 site로 구분하여 실시하였으며 시험방법 및 시험결과는 아래 표 8, 9와 같다.

표 8. 과거 시험파쇄 패턴

발파제원	A site	B site	C site	D site
암반종류	세일층(연암)	변성안산암(중경암)	세일층(연암)	변성안산암(중경암)
자유면 수	1자유면	2자유면	1자유면	2자유면
천공경(mm)	51	51	51	51
천공수	5공	13공	6공	20공
천공길이(m)	1.4	2.0	1.4	2.0
천공간격(m)	0.8~1	1.2~1.5	0.8~1	1.2~1.5
최소저항선(m)	0.8~1	1.2~1.5	0.8~1	1.2~1.5
적용폭약	뉴 화이텍카	뉴 화이텍카	기존 화이텍카	기존 화이텍카
장약량/공	180g×1본	180g×2본	60g×3본	60g×6본
총 장약량	0.9kg	4.68kg	1.08kg	7.2kg
전색 종류	모래+암분	모래+암분	모래+암분	모래+암분
전색 길이	1m	1.3m	1m	1.3m

표 9. 과거 시험파쇄 결과

발파제원	A site	B site	C site	D site
철포 발생공수	無	1공	3공	8공
암반 파쇄형태	양호	양호	부분적 균열 발생	부분적 균열 발생
계측 거리	30m	40m	30m	40m
발파 진동(kine)	N/A	0.149	0.148	0.23
발파 소음(dB(V))	N/A	70.7	72	79.2

메지에 따라 철포현상 및 파쇄도에 큰 영향을 미치며 저항선, 공간격이 클 때에는 파쇄도가 좋지 않아 철포 현상이 발생함을 알 수 있다. 상기 결과로 현장에서 사용할 수 있는 제안된 패턴은 표와 같다.

표 10. 과거 시험파쇄의 제안 패턴

구 분	1자유면			2자유면			
	천공장(m)	공간격(m)	장약량(gr)	천공장(m)	저항선(m)	공간격(m)	장약량(gr)
경 압	1.2	0.5	180	1.2	0.5	0.5	120
	1.5	0.6	240	1.5	0.6	0.6	180
	1.8	0.7	360	1.8	0.7	0.7	300
	2.0	0.8	420	2.0	0.8	0.8	360
보통압	1.2	0.6	180	1.2	0.6	0.6	120
	1.5	0.7	240	1.5	0.7	0.7	180
	1.8	0.8	360	1.8	0.8	0.8	300
	2.0	0.9	420	2.0	0.9	0.9	360
연 압	1.2	0.7	180	1.2	0.7	0.7	120
	1.5	0.8	240	1.5	0.8	0.8	180
	1.8	0.9	360	1.8	0.9	0.9	300
	2.0	1.0	420	2.0	1.0	1.0	360

자유면의 수가 적어질수록 공당 장약량이 많아지고, 연암일수록 저항선 및 공간격을 넓혀 설계를 하였다. 부득이한 경우가 아니라면 보통 자유면의 형성 후 파쇄를 실시하기 때문에 차후의 본 연구의 실험에서는 1 자유면에 대한 검토는 생략하였다.

4.3 사용현장 조사

4.3.1 부산 터파기 현장

진동 및 소음 등의 발파공해로 인한 민원 때문에 미진동 파쇄기로 암파쇄를 실시한 현장이다. 현장 암반은 연암, 보통암, 경암을 이루고 있으며 암종은 안산암류이다. 암석의 강도별로 총 60공을 시험 하였으며 시험 패턴은 표와 같다. 단, 표에 제시된 패턴은 파쇄 결과가 양호한 자료만 명시하였다.

표 11. 부산 터파기 현장의 미진동 파쇄기 사용 패턴

구분	천공장(m)	저항선(m)	공간격(m)	공당장약량(kg)	비장약량(kg/m ³)
연암	1.5	0.9	1.2	0.18	0.11
보통암	1.5	0.9	1.1	0.18	0.12
경암	2.2	0.8	1.0	0.36	0.20

상기 패턴을 보면 비장약량이 상당히 적게 나타났는데, 당 현장은 일반 발파와 같이 암석의 파쇄가 목적이 아니고, B/H작업이 편리하도록 암반에 균열을 주는데 그 목적이 있기 때문이다.

4.3.2 청주~상주간 고속도로 건설공사

도로건설 현장으로 화강질 편마암의 경암 지역이다. 민원의 발생으로 브레이커를 사용하였으나 시공성이 떨어져 미진동 파쇄기를 적용하기 위한 시험파쇄를 실시하였다.

표 12. 시험파쇄 패턴

횃 수	1회	2회	3회	4회	5회	6회	7회
	천공장(m)	1.5~1.7	1.5~1.7	1.9~2.1	2.7	2.7	2.7
천공경(mm)	45	45	45	45	45	45	45
천공수(공)	26	9	26	32	3	6	16
자유면 수	1	1	1	2	1	2	2
천공각도(∠°)	45	45	45	70	30	45	70
저항선(m)	-	-	-	0.7	-	0.7	0.7
공간격(m)	0.5~0.7	0.5~0.7	0.5~0.7	0.5~0.7	0.8~1.0	0.9~1.1	0.5~0.7
사용화약	FINECKER Plus, Φ30mm×330mm,180g/본						
사용뇌관	점화구						
전 색 제	석분	석분	석분	석분	석분+	석분+	석분+
					전색필름	전색필름	전색필름
장약상황	장약분수(ea)	1	2	2	2	3	3
	공당 장약량(kg)	0.18	0.36	0.36	0.36	0.54	0.54
	총 장약량(kg)	4.68	3.24	9.36	11.52	1.62	3.24
	장약방법	공저장약	Deck charge	Deck charge	Deck charge	Deck charge	Deck charge

시험파쇄 패턴은 표 12와 같다. 1자유면 경암 암반 파쇄를 실시한 결과 저항선 1.5~1.6m에서는 파쇄가 되지 않았으며, 천공각도를 조절하여 저항선을 줄이고 장약량을 늘려 시공한 결과 1자유면 경암 암반에서도 양호한 파쇄효과를 얻을 수 있었다. 또한 1자유면의 전색장은 저항선과 관련되므로 전색장이 1.5m이상의 패턴에 대해서는 파쇄가 되지 않았다. 전색제의 경우는 일반 석분으로 사용 시 공이 막히고 전색효과도 좋지 않아 석분을 전색 필름에 담아 사용하였다.

상기 시험 결과로부터 1자유면 발파 시 천공각도를 주어 저항선을 줄이며 deck charge를 함으로써 저항선을 줄이는 방법이 효과적인 것을 알 수 있다. 또한 석분을 전색 필름에 담아 사용하는 것이 전색효과가 좋다는 결론이 나왔다.

본 연구는 2자유면 파쇄를 기본으로 하고 있기 때문에, 본 시공사례 분석은 1자유면에서도 미진동 파쇄기가 유용하게 사용될 수 있다는 결과에 의의를 두고 패턴 분석에서는 제외시켰다.

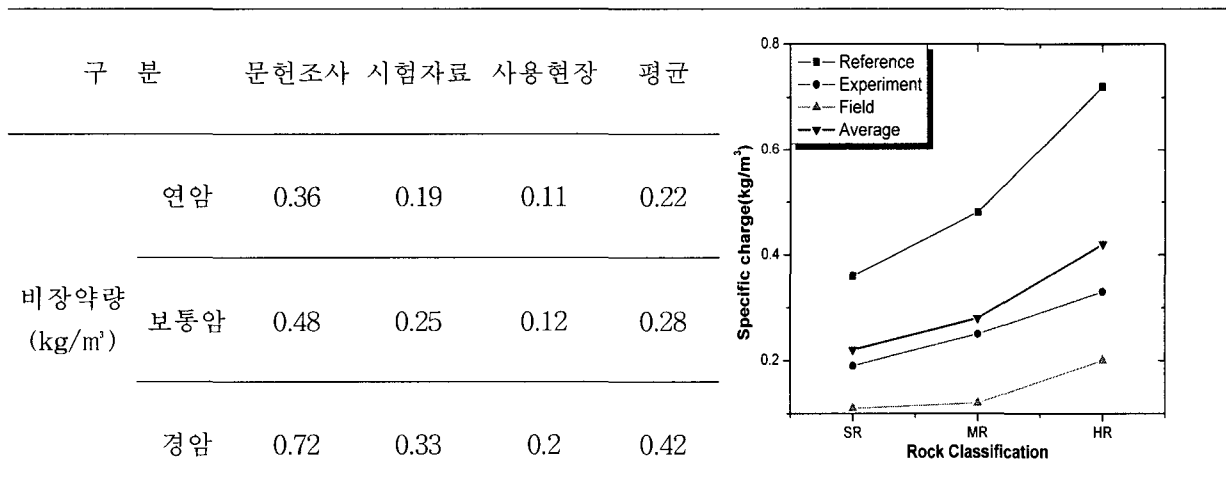
4.4 과거자료의 패턴 분석

과거의 연구 및 기존자료에 대한 전체적인 패턴을 검토하는 것은 어렵다. 각 현장마다 암석의 강도는 같다 하더라도 지질학적 요인이 변수가 될 수도 있고, 추구하는 파쇄의 정도도 틀리기 때문이다. 또한 미진동 파쇄기라는 화공품에 대한 보편화된 설계 패턴도 없는 실정이다. 더구나 과거의 연구는 개선전의 미진동 파쇄기를 가지고 연구한 내용이 다수 포함되어 있다.

본 시험이 개선된 미진동 파쇄기에 대한 현장 적용성을 확인하는 것에 있지만, 파쇄 패턴 등은 그 사용 실적이 적어 보편화 시킬 수 없으므로 과거의 자료 중 비장약량을 근거로 시험 패턴을 선정하였다.

미진동 파쇄기의 파쇄 목적, 지질학적 요소 등을 배제한 암석 강도만을 가지고 비장약량을 비교 하여 추후에 시험할 기본적인 패턴을 선정하였다. 표 13은 과거 자료에 대한 암석 강도별 비장약량의 비교이다.

표 13. 과거 자료의 비장약량



상기 그래프에서 보는 바와 같이 과거의 문헌조사의 비장약량이 가장 높게 나왔다. 이는 개선되기 전의 미진동 파쇄기를 근거로 비장약량을 산정하였기 때문이다. 또한 사용 현장의 비장약량은 매우 낮게 나타났는데 이는 앞에서 언급한 것과 같이 B/H작업이 용이하게 균열만 발생시키는 수준의 발파가 목적이기 때문이다.

따라서 본 연구에서는 이들 최소, 최대 비장약량을 이 범위 안에서 선정하였으며 비장약량은 저항선, 공간격, 천공장 등을 변환 시키면서 조절하였다. 많은 변수들의 차이로 다소 무리가 있을 수 있으나 과거 자료의 조사결과로는 연암, 보통암, 경암에서의 평균 비장약량을 0.22, 0.28, 0.42로 평가 할 수 있다.

5. 시험조건 및 방법

5.1 시험 현장 특성

암석의 강도별 패턴을 설정하기 위해서 암석의 강도가 연암, 보통암, 경암으로 구분되는 현장에서 시험을 실시하였다. 사전시험 격으로 1, 2차 시험은 석산 등 민원 발생 소지가 없는 현장을 선택 하였으며 3차는 실제 미진동 파쇄기를 사용하고 있는 도로 확장공사 현장에서 실시하였고 4차는 도심지 터파기 현장에서 시험을 실시하였다.

1차 시험 현장은 편마암질 암석으로 암이 신선한 부분에서의 강도는 경암 수준의 강도로 평가되었으나 절리 등의 지질학적 변형 요인을 많이 받아 현장암반 강도는 보통암 정도로 판단되었다. 또한 자유면 부근의 암반은 특히 선 발파의 영향을 많이 받아 암석강도는 보다 더 저하될 것으로 판단된다. 2차 시험 현장은 골재를 생산하는 현장으로 화강암 지역이며 수직 절리가 많이 발달된 지역이다. 암반의 외부는 다소 풍화를 받은 흔적이 있으나 암석의 강도는 경암 수준으로 나타났다. 3차 시험 현장은 도로 확장공사 현장으로 연암수준의 강도를 보이며 흑운모 편암으로 구성되어 있으며 4차 현장은 터파기 현장으로 화강암질 암석이지만 풍화가 많이 진행되어 풍화암 수준의 강도를 보였다.



그림 7. 1차 시험파쇄 현장전경

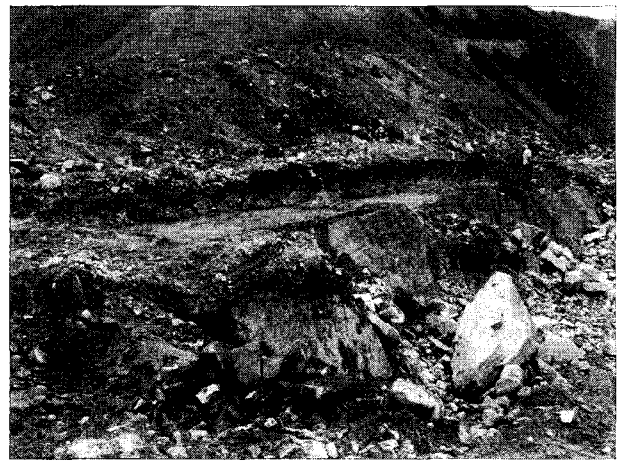


그림 8. 2차 시험파쇄 현장전경



그림 9. 3차 시험파쇄 현장전경



그림 10. 4차 시험파쇄 현장전경

5.1.2 강도 특성

슈미트해머는 콘크리트의 양생 강도를 추정하기 위하여 개발되었다. 슈미트해머는 현장이나 실내에서 쉽고, 신속하게 사용할 수 있으며, 손에 들 수 있을 정도로 가볍고, 소형인 장비이다. 또한 암석을 파괴하지 않고 실험할 수 있는 장점이 있다. 슈미트 해머는 암석의 상대적인 경도(hardness)를 나타내는 탄성 반발 지수를 얻기 위하여 암석표면에 대고 타격하는데, 슈미트해머 수치는 타격하는 입자의 정도 뿐만 아니라 암석입자 사이의 결합력 효과도 역시 반영하고 있다.

현장별 암석의 특성을 평가하는 데에는 절리의 특성, 지하수 등을 고려한 지질학적인 요소와 암석의 강도와 같은 역학적인 요소가 있는데 당 현장에서는 암석의 평가를 단순화시켜 차후 현장 적용성을 편리하게 하기 위해 슈미트해머의 반발 치로 그 구분을 실시하였다.

암석의 강도를 구분하기 위해 사용된 슈미트 해머의 제조사는 SANYO TESTING MACHINES CO., LTD. 이고 제품명은 SANYO GSR이다. 또한 이 제품의 타격력은 2.21 Nm이다.

암석의 분류는 건설교통부에서 제시한 암석분류를 기준으로 하였으며, 반발치의 강도 환산은 제품에 명시되어 있는 환산강도 표에 적용하여 변환 하였다.

표 14. 건설 교통부 암석 분류

구 분	탄성과속도		암석 시험편 압축 강도(kgf/cm ²)	
	현장 압반(m/s)	암석 시편(m/s)	A	B
풍화암	700~1,200	2,000~2,700	300~700	100~200
연 암	1,200~1,900	2,800~3,700	700~1,000	200~500
보통암	1,900~2,900	3,700~4,700	1,000~1,300	500~800
경 암	2,900~4,200	4,700~5,800	1,300~1,600	800<
극경암	4,200<	5,800<	1,800<	-

1~4차 시험현장 암석은 암석 분류상 A그룹에 속하는 암석들이다.

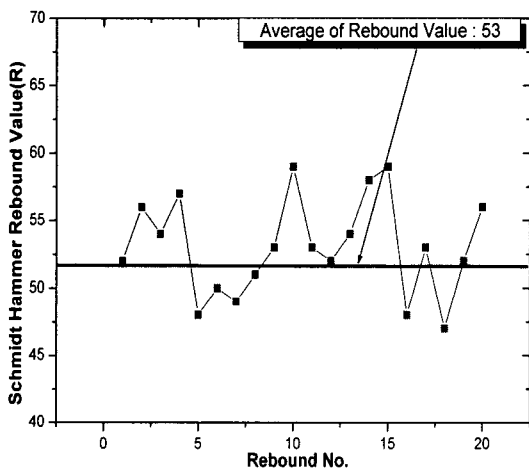


그림 11. 1차 시험현장 반발치(R)

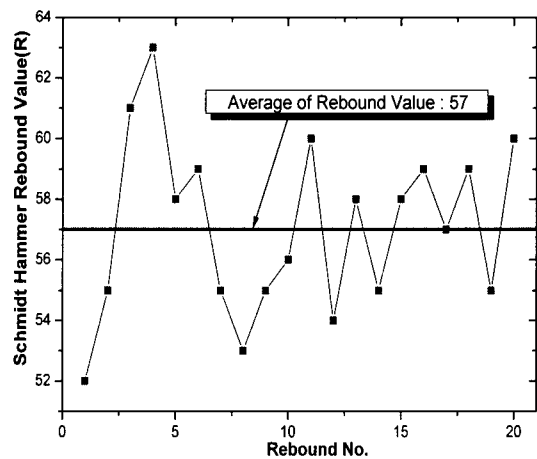


그림 12. 2차 시험현장 반발치(R)

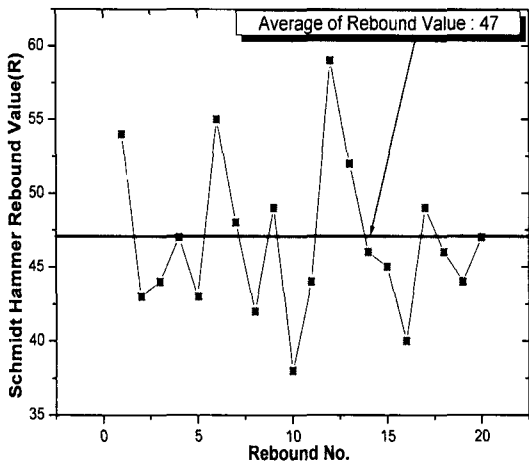


그림 13. 3차 시험현장 반발치(R)

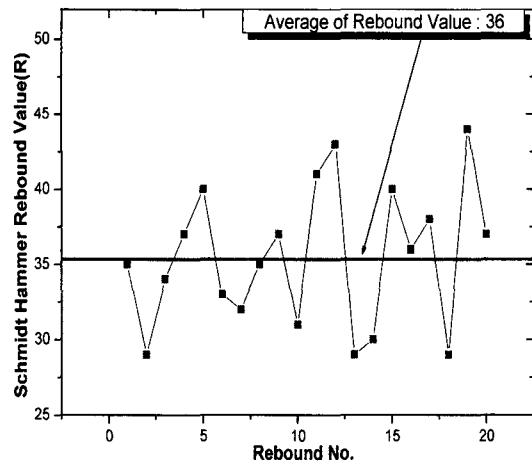


그림 14. 4차 시험현장 반발치(R)

30회의 타격 후 낮은 수치 10개는 제외시키고 상위 20개의 수치로 평균 반발치를 구하였다.

표 15. 시험현장의 암석 분류(강도특성)

구 분	1차 현장	2차 현장	3차 현장	4차 현장
반발치(R)	53	57	47	36
암석강도환산치(kgf/cm ²)	1,188(보통암)	1,563(경암)	789(연암)	373(풍화암)

5.2 시험파쇄 패턴 선정

기존자료의 비장약량의 검토결과를 근거로 시험패턴을 선정하였다. 일반적으로 터파기 현장은 천공장을 1.5m, 2.5m로 시공하므로 기본 패턴의 천공장도 이와 동일하게 하였으며 저항선 및 공간격을 조절하여 비장약량을 고려하였다.

표 16. 시험파쇄 패턴

구분	천공장(m)	저항선(m)	공간격(m)	공당장약량(kg)	비장약량(kg/m ³)
Type-1	1.5	0.5	0.5	0.18	0.48
	1.5	0.6	0.6	0.18	0.33
	1.5	0.7	0.7	0.18	0.24
	1.5	0.8	0.8	0.18	0.19
Type-2	2.5	0.6	0.6	0.36	0.40
	2.5	0.7	0.7	0.36	0.29
	2.5	0.8	0.8	0.36	0.23
	2.5	0.9	0.9	0.36	0.18

공당 장약량에 따라 Type 1,2로 구분을 하였으며 연암, 보통암, 경암에서의 적용 패턴을 구분하여 적용하였다. 상기와 같은 패턴으로 시험을 실시하면서 전색제, 파쇄력, 진동특성 등의 시험을 진행하였다.

5.3 시험파쇄 세부사항

5.3.1 전색제 test

전색제 시험은 크게 전색 재료와, 전색 방법에 대하여 실시하였다. 현재 미진동 파쇄기의 전색제로는 에폭시, 모르타르, 규산, 모래 등 여러 가지로 알려져 있다. 전색제의 선별은 경제성 및 시공성 등을 고려하여 실질적으로 사용 가능한 재료를 선택하여 시험하였다. 이러한 점들을 고려하여 시험 전색 재료를 모래, 쇄석, 모르타르로 나누어 시험을 실시하였다.

전색제 시험은 공발 현상의 위험 때문에 일반 석산(1,2차 시험파쇄)에서 실시하였다. 시험의 진행은 1차 현장에서 전색재료 선별에 대한 적합성 및 각 전색제를 혼합하여 시험을 실시하였으며, 2차는 1차 시험결과를 검증하는 단계로 시험을 실시하였다.

표 17. 전색 재료의 특징

전색제 종류	특 성
마른모래	시중 구입이 용이하고 서로 뭉치지 않을 정도로 수분이 포함되지 않은 상태
젖은모래	시중 구입이 용이하고 서로 뭉칠 정도의 수분이 포함된 상태
쇄 석	시중 구입이 용이하고 직경 5mm이하로 압분과 섞여 있는 상태의 쇄석
모르타르	모래와 시멘트가 혼합된 제품 사용. 한일 시멘트에서 생산 중인 레미탈 사용 포장단위 : 40kg
급결제	보편적으로 시멘트와 혼용해서 쓰는 급결제. 국제방수에서 생산중인 급결제 사용 포장단위 : 2.5ℓ

가. 1차 시험

전색 방법에 대해서는 상기 전색재료에 대하여 단일 재료만으로 시험하는 패턴과 혼합하여 시험하는 패턴으로 나누어 시험을 실시하였다. 단일 전색제 시험의 경우는 전색장을 1.17, 1.0, 0.7m로 시험을 실시하였으며 혼합 전색제의 경우의 시험내용은 표 18과 같다.

표 18. 혼합 전색제 시험 내용

구 분	모래	모래:쇄석		모래:쇄석		모래:모르타르		모래:모르타르	
	(100)	(60:40)		(60:40)		(70:30)		(70:30)	
	모래	모래	쇄석	모래	쇄석	모래	모르타르	모래	모르타르
1TYPE	1.17m	0.70m	0.47m	0.70m	0.47m	0.82m	0.35m	0.82m	0.35m
2TYPE	1.84m	1.10m	0.74m	1.10m	0.74m	1.29m	0.55m	1.29m	0.55m

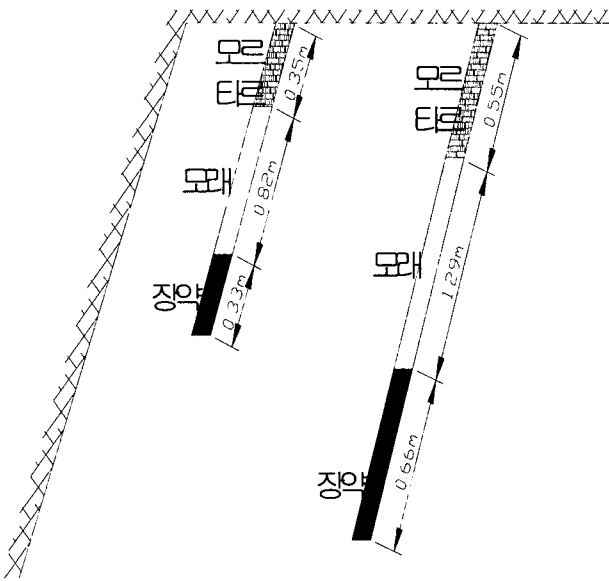


그림 15. 혼합 전색제 test 패턴도

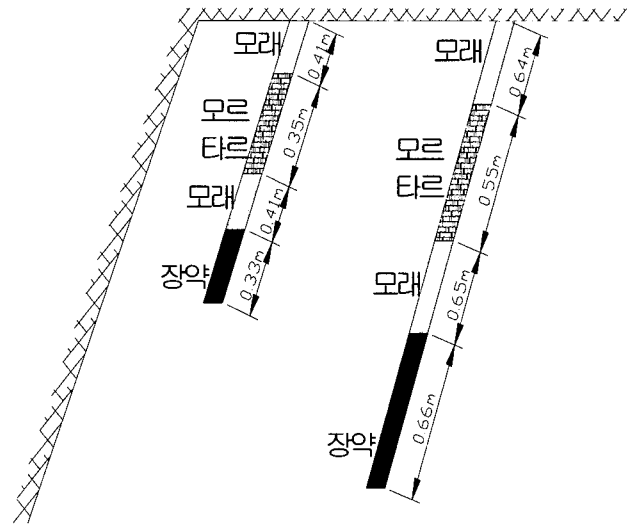


그림 16. 혼합 전색제 test 패턴도

전색 방법에 대해서는 그림 15, 16과 같이 모래와 모르타르, 모래와 쇄석을 혼합하는 시험을 실시하였다. 전색방법은 모래의 경우는 일반 현장에서 사용하는 방법과 동일하게 비닐(길이60cm)에 넣어 삼등분 하면서 전색을 실시하였으며, 쇄석은 비닐에 넣지는 않았으나 모래와 같은 양으로 전색 시험을 실시하였다. 모르타르의 경우는 레미탈:물:급결제를 무게비로 3 : 0.5 : 0.1로 혼합하여 시험을 실시하였으며 급결제 혼합 후 바로 전색 작업을 실시하였다.

나. 1차 시험 검토

공발 현상의 유무로 그 결과를 판단하였다. 단일 전색제의 경우 모래, 쇄석, 모르타르로 전색을 실시하였으며 전색장이 가장 짧은 0.7m에서도 공발 현상은 발생하지 않았다. 혼합 전색제의 경우도 공발 현상은 발생하지 않았다. 이런 결과로부터 시공방법이 복잡한 혼합 전색제를 사용할 필요가 없으며 단순히 모래나 쇄석만으로 그 전색효과를 충분히 볼 수 있다는 결과를 얻을 수 있었다. 이는 보통암 정도의 강도를 나타내는 현장에서의 시험이므로 2차 시험은 경암에서 1차 시험의 결과를 가지고 시험을 실시하였다.

다. 2차 시험

보통암에서 시험한 1차 시험 결과를 바탕으로 경암에서의 2차 시험을 실시하였다. 1차 결과에서 보는 바와 같이 전색제의 혼합은 그 효과가 없고 시공이 불편하므로 시험에서 제외시켰으며, 2차의 주된 평가는 전색 방법에 대한 평가이다.

시험방법은 최소 전색장을 0.7m로 하여 0.1m간격으로 유효 전색장 평가를 실시하였다. 우선적으로 전색효과가 가장 미흡할 것으로 예상되는 모래로 시험을 실시하였다. 또한, 다짐의 정도에 차이를 두어 평가하였다. 다짐의 정도는 정량적인 평가는 하지 못하였으며 다짐봉으로 3회, 5회 다짐으로써 그 정도에 차이를 두었다.

라. 2차 시험 검토

표 19. 경암에서의 전색제 test 결과

시험횟수	전색장	결 과
1	0.6	공발 현상이 발생하지 않음. 내부 균열로 인한 가스압 누출
2	0.7	공발 현상 발생(파쇄 흔적 없음) 전색작업 시 다짐 정도를 타 시험보다 약하게 실시(3회 다짐)
3	0.8	공발 현상 발생되지 않음. 육안 균열 관찰
4	0.9	공발 현상 발생되지 않음. 육안 균열 관찰
5	1.0	공발 현상 발생되지 않음. 육안 균열 관찰
6	0.7,8	공발 현상 발생되지 않음. 육안 균열 관찰
7	0.7,8	전색장이 0.7인 부분에 대해서는 공발 현상 발생 공발현상이 일어났으나 #2파쇄보다는 그 정도가 약하였으며 외부 균열 흔적 관찰

2차 시험결과는 표 19와 같이 정리할 수 있는데 전색장이 0.8m이후에서는 모래만으로도 공발 현상이 발생하지 않아 모래와 전색 효과가 비슷한 쇄석 및 전색효과가 우수한 모르타르 시험은 생략하였다. 다짐 정도를 약하게 실시한 전색장이 0.7m의 경우는 불꽃이 분출되는 공발현상이 발생하였으며, 다짐정도를 강하게 실시한 경우는 공발현상이 발생하였으나 공구 주변에 파쇄 흔적을 볼 수 있었다. 0.6m의 경우는 기존의 균열이 발달되어 있어 평가에서 제외하였다.

1, 2차 시험 결과로 다짐 정도를 강하게 실시하고 전색장이 0.8m이상 확보 된다면 미진동 파쇄기의 전색제로 모래가 충분하다는 것을 알 수 있다. 이는 3, 4차 시험의 진행시 적용함으로써 그 결과를 입증하였다.

5.3.2 파쇄력 test

가. 시험 패턴

앞에서 언급한 기본패턴으로 시험을 진행하였으며 일부 현장에 대해서는 현장 특성상 전패턴을 시험하지 못하였다. 시험 적용한 패턴은 표 20과 같다.

본 시험의 파쇄는 일반 발파에서와는 다른 암석에 균열권을 형성에 주는 파쇄 정도를 의미한다.

표 20. 시험파쇄 패턴

구분	천공장(m)	저항선(m)	공간격(m)	1차(보통암)	2차(경암)	3차(연암)	4차(풍화암)
Type-1	1.5	0.5	0.5	◎	◎	◎	◎
	1.5	0.6	0.6	◎	◎	◎	◎
	1.5	0.7	0.7	◎	◎	◎	◎
	1.5	0.8	0.8	◎	×	◎	◎
Type-2	2.5	0.6	0.6	◎	×	×	◎
	2.5	0.7	0.7	◎	◎	×	◎
	2.5	0.8	0.8	◎	◎	×	◎
	2.5	0.9	0.9	◎	◎	×	◎

자유면 형성이 잘된 2자유면에서 시험하였으며, 지발당 2~3공씩 파쇄하였다. 기본적으로 1열 파쇄를 기본으로 하였으나 현장 여건상 2,3열 파쇄도 실시하였다.

나. 검토

전 시험과정에서 공발현상이 발생되지 않아, 전색제 시험결과를 보충 할 수 있었다. 파쇄 정도의 정량적인 측정이 불가능 하여 파쇄 결과는 B/H작업으로 가능, 불가능을 검증 하였는데 모든 패턴이 무리 없이 작업이 되었다. 파쇄도의 경우는 패턴마다 다소 차이가 발생 하였는데 정확한 분석이 힘들 뿐 아니라 미진동 파쇄기의 목적상 파쇄도의 중요성은 떨어지므로 고려 대상에서 제외시켰다.

추후에 현장에서 미진동 파쇄기의 적용 시 상기 패턴의 범위 안에서 패턴 선정을 하면 무리가 없을 것으로 판단되며 이는 해당 현장에서의 시험 후에 현장의 목적에 적합한 패턴을 선정하는 것이 타당할 것이다. 본 연구에서는 풍화암~경암까지의 적용 가능한 패턴을 제안한 것으로 파쇄력 시험의 의의를 두고 있다.



그림 17. 미진동 파쇄기 파쇄 결과 (보통암)



그림 18. 미진동 파쇄기 파쇄 결과 (경암)

5.3.2 진동 test

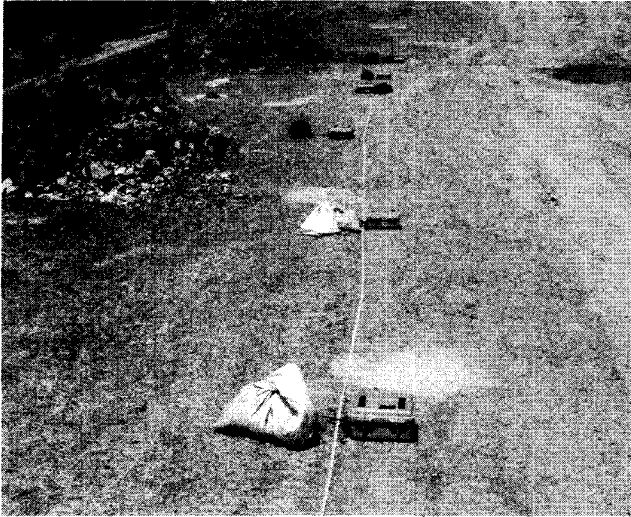
가. 시험 방법

각 현장에서의 시험 시 일정 거리에 계측기를 설치하여 그때의 진동 특성을 평가하였다. 연암, 경암, 보통암의 진동 특성을 구분 하였다. 측정에 사용된 장비는 미국 PMT사의 eXAD-8 6대를 사용하였다.

시험파쇄는 연암 지역에서 총 24회, 보통암 지역에서 10회 및 경암 지역에서 17회를 실시하였으며, 계측된 data는 연암에서 98개, 보통암에서 33개 및 경암에서 44개로 총 175개의 Data를 획득하였다.

또한 일반 폭약과의 진동 특성을 분석하기 위한 시험을 진행하였다. 기존의 폭약에 대한 계측 data는 많이 존재하나 같은 현장에서의 동일 장약량을 시험함으로써 계측치의 편차를 최소화 하여 시험을 실시 하였다. 일반적으로 주로 사용되는 Emulsion계 폭약인 NewMITE와 미진동파쇄기의 진동속도와 파쇄효과를 비교하기 위해 NewMITE I을 0.18kg으로 절단하여 미진동 파쇄기 3분(0.54kg)일때 동일한 장약량으로 3공씩 파쇄를 실시하였으며, 동일한 거리에서 계측을 실시하여 진동속도의 차이를 비교하였다.

표 21. 계측 전경 및 계측기 제원

eXAD-8	계측기 제원
	Sample Storage Rate : 1024 SPS
	Resolution : Vibration: 0.02 mm/s, Mic: 1 dB
	Data Storage : Over 300 Events, 2MB memory
	Seismic Range : 8.0cm/sec
	Seismic Trigger Level : 0.05 ~ 2.5cm/sec
	Sound(dB(A)) : 40 ~ 90dB(A)
	Air(dB(L)) : 90 ~ 140dB(L)
Frequency Response Velocity : 3~250Hz	
Frequency Response Mic. : 1~8000Hz	

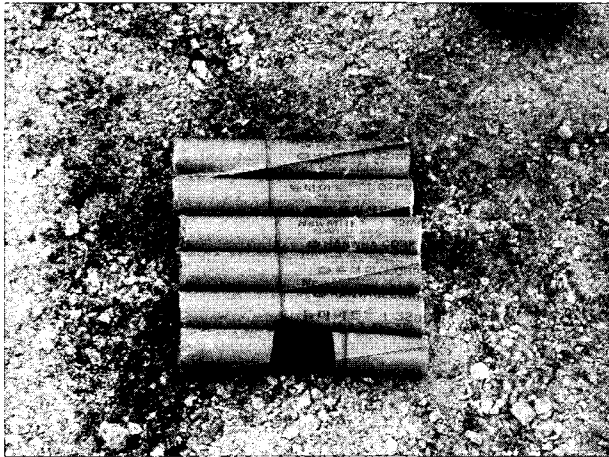


그림 19. 180 g 폭약 성형



그림 20. 성형된 폭약의 장약

나. 계측 결과

계측 결과를 정리하면 표 22와 같다. 풍화암의 경우는 본 연구 계측결과와 그 성향에 일관성이 없어 분석 자료에서 배제 시키고 추후에 보충 시험을 통하여 검증하기로 하였다.

표 22. 진동계측 결과

암석 분류	파쇄 횟수	총공수	지발 공수	파쇄 제원			진동속도		
				천공장	저항선, 공간격	지발당 장약량(kg)	거리(m)	mm/sec	계측 data
연암	24	86	1~4	1.5	0.5~0.9	0.18~0.72	5~42	0.533~5.095	98
보통암	10	30	3	1.5~2.5	0.5~0.6	0.54~1.08	1~27	0.700~35.440	33
경암	17	39	1~3	0.9~2.7	0.5~0.9	0.18~1.08	4~29	0.307~11.332	44

추정거리를 1.0~42.0m 범위내에서 변화시키면서 연암에서는 98개, 보통암에서는 33개, 경암에서는 44개의 data를 획득하였으며 총 175개의 data로 분석하였다. 일반 폭약과의 비교를 위한 시험은 별도로 분석하였다.

다. 회귀 분석

각각의 암 강도별 입지상수와 전체 data를 포함하는 입지상수 K, n값을 구하기 위하여 최대진동속도와 환산거리의 log-log 1차 상관관계를 이용하여 전산처리 하였다. 이때 최대진동속도는 접선, 진행 및 수직방향의 성분을 합성한 실벡터 값을 적용하였다.

각각의 식은 미진동 파쇄기 사용 시의 자승근 환산거리와 삼승근의 환산거리를 나타내며, 진동예측식은 95%의 신뢰도를 갖는 진동예측식을 선택하였다.

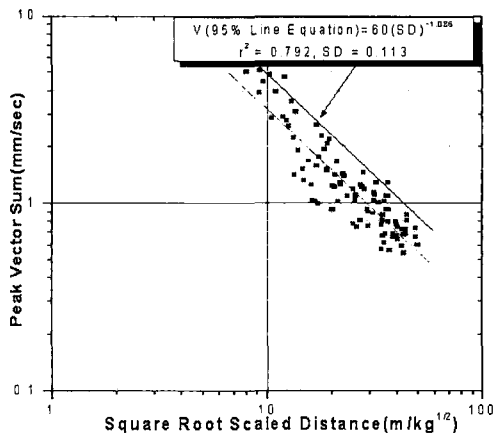


그림 21. 연암에서 자승근 회귀분석

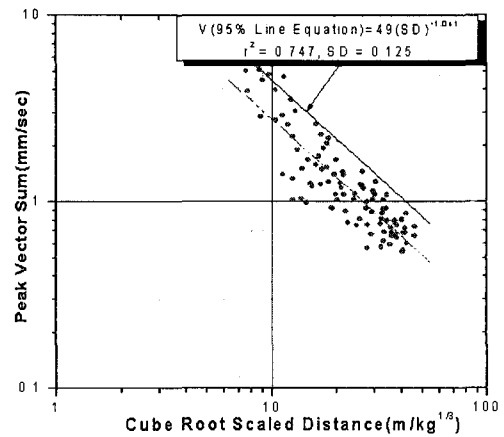


그림 22. 연암에서 삼승근 회귀분석

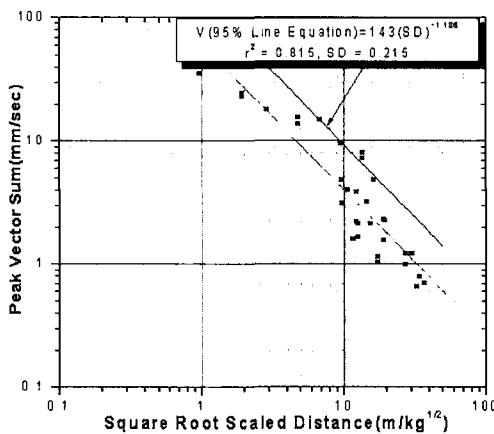


그림 23. 보통암에서 자승근 회귀분석

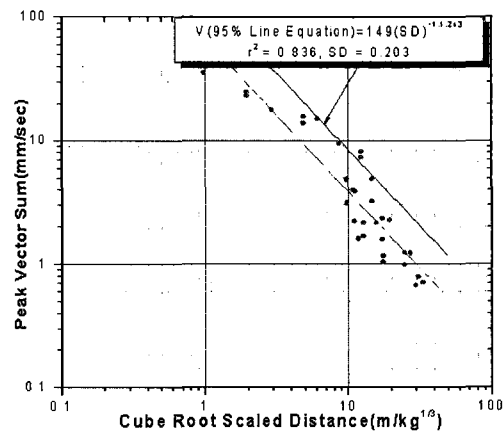


그림 24. 보통암에서 삼승근 회귀분석

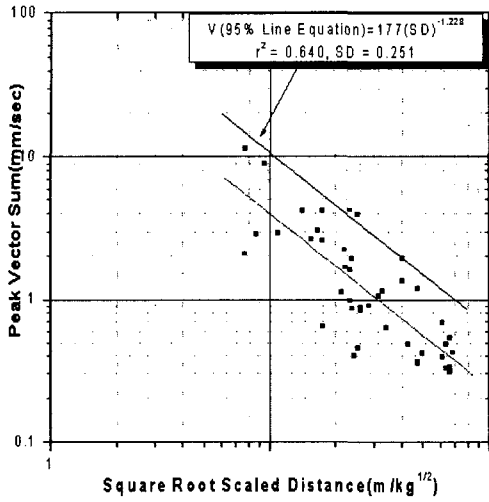


그림 25. 경암에서의 자승근 회귀분석

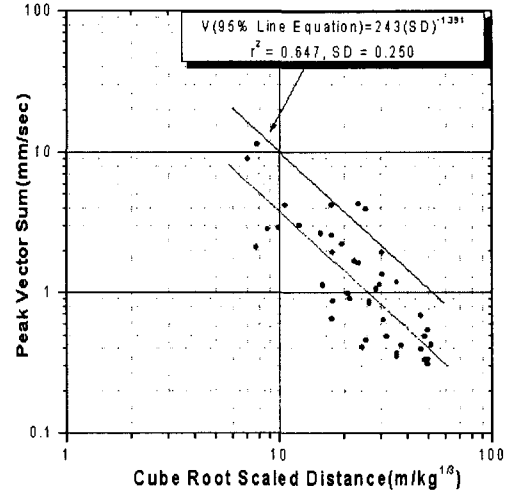


그림 26. 경암에서의 삼승근 회귀분석

상기 그림에서와 같이 연암, 보통암, 경암에서 각각 회귀 분석을 실시하여 암석의 강도별 진동 특성을 규명하였다. 이들 data을 전부 포함하는 회귀 분석은 아래와 같다.

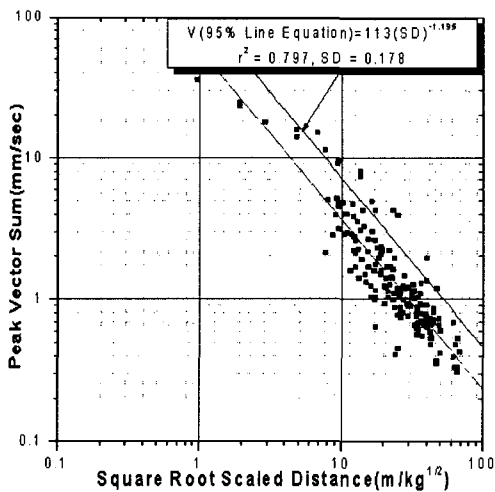


그림 27. 전체 data의 자승근 회귀 분석

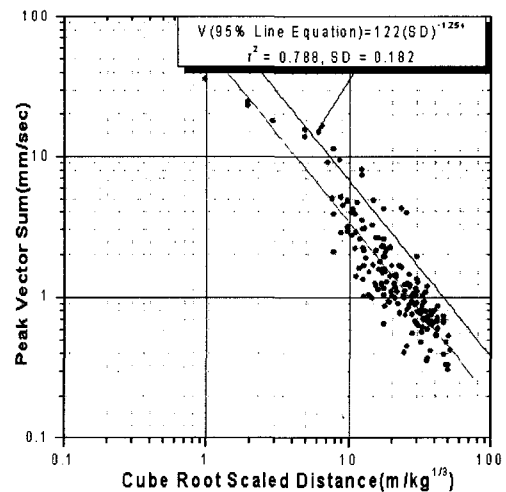


그림 28. 전체 data의 삼승근 회귀 분석

표 23. 미진동 파쇄기의 입지상수 값

구분	입 지 상 수					
	자승근			삼승근		
	K	n	r ²	K	n	r ²
연암	60	-1.086	0.792	49	-1.041	0.747
보통암	143	-1.186	0.816	149	-1.243	0.836
경암	176	-1.228	0.640	243	-1.391	0.647
전체	113	-0.195	0.797	122	-1.254	0.788

진동 예측식(95%) $V(mm/sec) = K (SD)^{-n}$

미진동파쇄기 적용시, K(지질상수)값은 연암에서 49~60, 보통암에서 143~149, 경암에서 176~243로써 일반적으로 설계단계에서 적용되는 미광무국 식의 1600(mm단위)보다 연암에서는 27~33배, 보통암에서는 10~11배, 경암서는 7~9배 정도의 낮은 수치로 나타났으며, n(감쇄지수)값은 연암에서 -1.041~1.086, 보통암에서 -1.186~1.243, 보통암에서는 -1.228~1.391 수준으로 나타나 상대적으로 감쇄지수는 낮게 나타났다. K값이 낮다하더라도, 감쇄지수 n값이 낮을 경우 그 감쇄정도가 적다는 의미이므로, 절대적으로 K값만으로 진동의 크기는 비교할 수 없으며, 상기식에 의한 사용가능한 최대 지발당 장약량을 비교하는 것이 타당 할 것이다. 이러한 미진동파쇄기의 특성은 정적 인장파괴에 기인하는 미진동 파쇄기 특유의 진동 특성으로 파악될 수 있을 것이다.

그러나 이는 암반의 상태(강도, 절리상황 등)에 따라서 변화할 수 있으므로, 지속적인 실험과 계측을 통해 미진동파쇄기의 진동예측식을 일반 폭약의 진동예측식과 구분하여 적용할 수 있도록 하여야 할 것이다.

위 분석된 회귀분석 식을 근거로 하여 연암에서의 최대 지발당 장약량을 1.0Kg으로 하였을 때 거리별 최대 진동 속도와, 허용진동 속도가 3mm/sec일 때의 거리별 최대 진동속도와 지발당 장약량을 아래 그림 29, 30에 나타내었다.

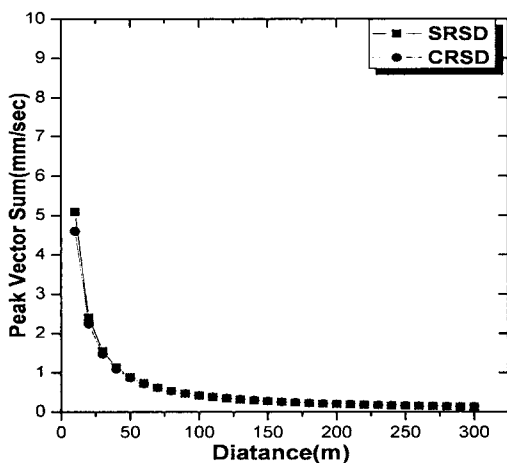


그림 29. 최대 진동속도의 감소 (연암)

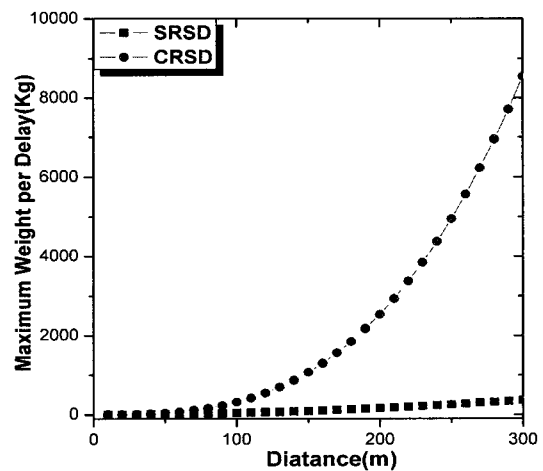


그림 30. 지발당 최대 장약량의 증가 (연암)

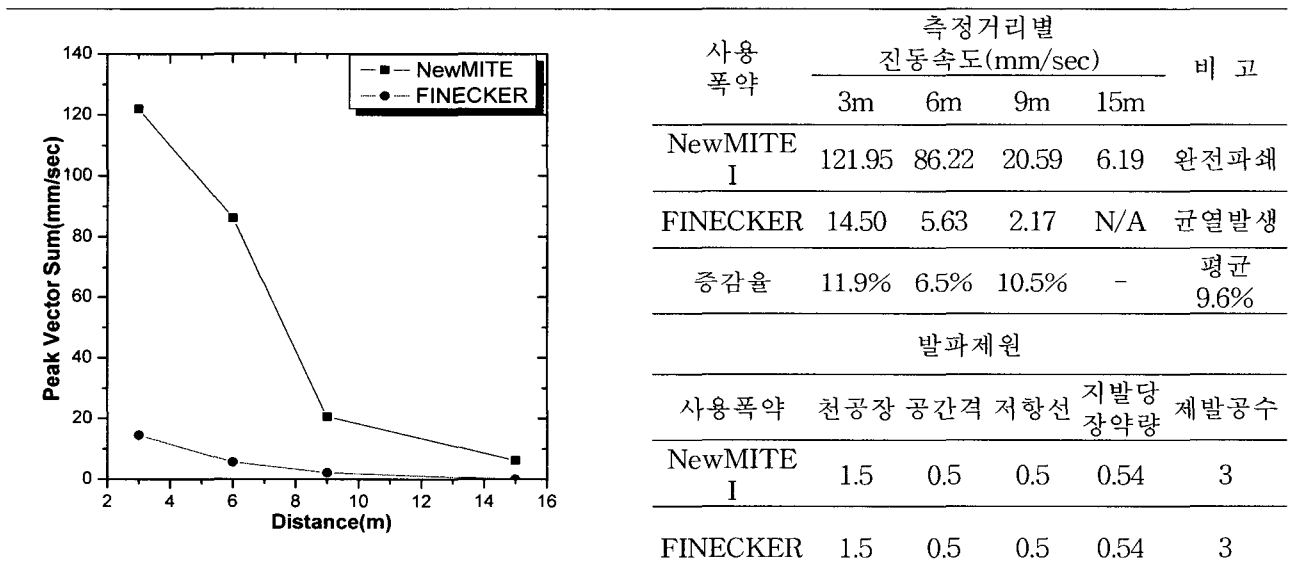
상기 그림에서와 같이 30m 이내의 거리에서는 진동의 감쇄정도가 상당히 높은 것을 알 수 있으며, 30m 이상의 거리에서는 감쇄정도가 어느 정도 완만해지는 것을 알 수 있다. 또한 거리와 지발당 최대 장약량의 관계를 살펴보면 자승근의 환산거리(CRSD)를 적용시 거리가 멀어질수록 지발당 장약량은 급격히 증가하는 경향이 있으나 자승근의 환산거리(SRSD) 적용시는 어느 정도 완만하게 지발당 장약량이 증가하는 것을 알 수 있으며, 10m내외에서 자승근과 삼승근이 교차하고 있다. 이는 보통암과 경암의 경우에도 같은 양상을 보인다. 따라서 미진동 파쇄기에 의한 암 파쇄시 자승근의 환산거리를 적용하여 최대 지발당 장약량을 산정하는 것이 안전율을 높일 수 있을 것으로 판단된다.

라. 일반폭약과의 진동비교

일반적으로 주로 사용되는 Emulsion계 폭약인 NewMITE와 미진동파쇄기(FINECKER)의 진동속도와 파쇄효과를 비교하기 위해 NewMITE I을 0.18kg으로 절단하여 미진동 파쇄기 3본(0.54kg)일때 동일한 장약량으로 3공씩 파쇄를 실시하였으며, 동일한 거리에서 계측을 실시하여 진동속도의 차이를 비교하였다. 본 실험에서는 파쇄 결과 Emulsion 폭약 사용시는 완전파쇄가 이루어 졌으며, 미진동 파쇄기 사용시는 암반에 균열대가 형성되는 것을 확인할 수 있었다.

최대 진동속도는 미진동파쇄기 사용시 Emulsion 폭약 대비 평균 9.6%정도의 진동수준을 나타내는 것으로 측정되었다. 이는 동일한 지발당 장약량 적용시 Emulsion 폭약이 약10배 정도 크게 나타나고 있음을 의미한다.

표 24. 미진동 파쇄기와 폭약(NewNITE)과의 진동 특성 비교



마. 검 토

시험파쇄에 의해 추정된 진동예측식의 적용성을 높이기 위하여 각각의 암강도에 따른 진동예측식과 측정된 모든 data를 종합하여 분석된 진동예측식을 USBM식 $V = 1600 (D/W^{1/2})^{-1.6}$ 과 비교하였다. 각각의 식은 미진동 파쇄기 사용시의 암 강도별 자승근 환산거리와 최대진동속도와의 관계를 나타낸다.

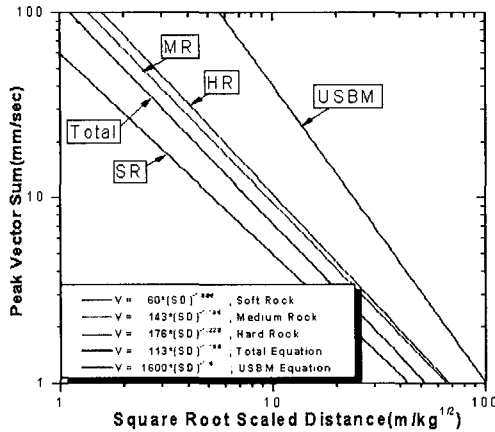


그림 31. 최대 진동 속도 비교

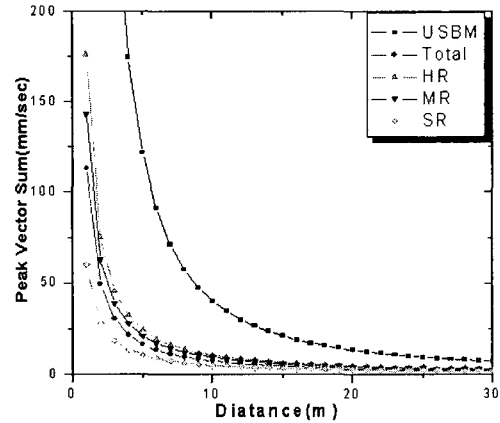


그림 32. 거리에 따른 진동속도의 비교 (1.0kg)

그림 31은 자승근의 환산거리를 적용하였을 때 진동예측식을 기초 설계단계에서 적용되는 USBM(미광무국)의 진동예측식과 경암, 보통암, 연암 및 전체 자료에 대한 진동예측식과 비교한 결과이다. 여기서 K값은 mm단위로 환산하여 1600을 사용하였다.

위 그림에서 알 수 있듯이 본 시험과쇄 결과에서 얻은 진동예측식은 USBM식에 비해 아래쪽에 위치한 것을 알 수 있으며, 환산거리가 가까울수록 진동속도의 차이가 더 큰 것을 알 수 있다. 이는 일반 폭약의 적용시 사용되는 USBM식을 미진동 과쇄기에 일률적으로 적용시 큰 오차를 범할 수 있음을 시사한다. 또한 지발당 1.0kg을 사용 시 거리에 따른 진동속도를 비교한 그림 32에 나타내었으며, 각각의 식을 적용시, 전체적으로 USBM식이 가장 높은 진동속도를 나타내는 것을 알 수 있다.

표 25. 거리에 따른 최대 지발당 장약량의 비교(3mm/sec 기준시)

Distance (m)	USBM	Total	HR	MR	SR
10	0.039	0.230	0.132	0.148	0.402
20	0.156	0.921	0.527	0.592	1.607
30	0.351	2.073	1.186	1.331	3.616
40	0.624	3.686	2.109	2.366	6.429
50	0.975	5.759	3.295	3.697	10.045
60	1.405	8.293	4.744	5.324	14.464
70	1.912	11.288	6.458	7.247	19.688
80	2.497	14.743	8.435	9.465	25.714
90	3.160	18.659	10.675	11.980	32.545
100	3.902	23.036	13.179	14.790	40.179
120	5.618	33.172	18.978	21.297	57.857
140	7.647	45.151	25.831	28.988	78.750
160	9.988	58.973	33.738	37.862	102.858
180	12.641	74.638	42.700	47.919	130.179
200	15.607	92.146	52.716	59.159	160.715
250	24.385	143.978	82.369	92.435	251.117
300	35.115	207.328	118.611	133.107	361.609

Unit : kg

표 25는 각각의 식을 적용 시 거리에 따른 최대 지발당 장약량의 변화를 나타내는 그림으로써, 본 시험파쇄 결과에서 얻어진 진동예측식을 적용시는 USBM 진동예측식과는 그 증가의 양상이 상이한 것을 알 수 있다. 따라서 근거리에서의 적용성 면에서는 당 시험파쇄에서 얻은 진동예측식이 더 미진동 파쇄기의 특성을 잘 표현할 수 있는 진동예측식이라 판단되며, 미진동 파쇄기를 사용하여 근접한 구조물에서 파쇄를 시행 시, 본 연구에서 얻은 진동예측식을 사용한다면 안전율을 높일 수 있을 것으로 판단된다.

본 연구에서 진동이 가장 크게 나타난 경암 부분에서의 안전율 2를 고려한 제안 진동식은 $V = 350 (D/W^{1/2})^{-1.228}$ 와 같은데, 이는 USBM에서 제안한 일반발파식 $V = 1600 (D/W^{1/2})^{-1.6}$ 와 비교하면 20%수준의 강도를 나타낸다. 물론 감쇄지수는 USBM의 식이 더 크게 나타나므로 거리가 멀어질수록 그 차이는 감소할 것이다. 미진동 파쇄기는 근거리에서의 진동 제어가 중요한 관건이므로, 30m 이내의 지역에서는 경암에서 안전율을 고려한 진동식이 타당할 것이다.

6. 결론

본 연구는 암석의 강도가 각기 다른 4곳의 현장에서 적용성을 검토하였다. 크게 전색제, 파쇄력, 진동특성으로 구분하여 결과를 정리하였지만, 미진동 파쇄기 사용의 전반적인 내용에 대한 연구라 할 수 있다. 각 결과는 정리하면 다음과 같다.

- 1) 전색장이 0.8cm이상 확보되면 모래 전색만으로 전색이 가능하다. 이는 2차 시험결과로 확인된 사실이며, 3,4차 시험을 진행하면서 검증하였다. 확인한 모래 전색 조건은 젖은 모래를 비닐에 넣어(약 50cm) 2개로 나누어 공에 넣고 일반 발파시보다 다짐정도를 강하고 견고하게 2-3회 정도씩 다짐하여야 한다는 것이다.
- 2) 풍화암에서 연암까지 파쇄의 적정 파쇄 패턴은 아래와 같다.

구분	적용암반	천공장(m)	저항선(m)	공간격(m)	공당장약량(kg)	비장약량(kg/m ³)
Type-1	보통암~경암	1.5	0.5	0.5	0.18	0.48
		1.5	0.6	0.6	0.18	0.33
	풍화암~연암	1.5	0.7	0.7	0.18	0.24
		1.5	0.8	0.8	0.18	0.19
Type-2	보통암~경암	2.5	0.6	0.6	0.36	0.40
		2.5	0.7	0.7	0.36	0.29
	풍화암~연암	2.5	0.8	0.8	0.36	0.23
		2.5	0.9	0.9	0.36	0.18

각 패턴별로 그 효과에 대한 정량적인 평가는 못하였으나 과거 사용현장 분석 및 본 시험을 진행하는 과정에서 암석의 강도별 적용패턴은 위에서 제시한 패턴이 적합할 것으로 판단된다. 물론, 각 현장마다 파쇄의 목적 및 정도가 틀리므로 현장특성에 맞는 경제적인 파쇄를 선별하여 적용하여야 할 것이다. 단, 상기 패턴은 암반에 crack을 발생시키는 2차 파쇄 하는 것을 전제로 한 수준의 파쇄이며, 일반 발파와 같이 암반의 moving은 기대할 수 없다.

3) 본 시험을 통한 암석강도별 미진동 파쇄기의 진동식은 아래와 같다.

구분	입 지 상 수					
	자승근			삼승근		
	K	n	r ²	K	n	r ²
연암	60	-1.086	0.792	49	-1.041	0.747
보통암	143	-1.186	0.816	149	-1.243	0.836
경암	176	-1.228	0.640	243	-1.391	0.647
전체	113	-0.195	0.797	122	-1.254	0.788
제안 진동식	$V = 350 (D/W^{1/2})^{-1.228}$					

일반 폭약의 적용시 사용되는 USBM식을 미진동 파쇄기에 일률적으로 적용 시 큰 오차를 범할 수 있으므로 별도의 진동식이 필요하다. USBM(미광무국)의 진동예측식과 시험을 통한 진동식 중 안전율을 고려하여 경암에서의 진동식을 표준화 시키는 것이 타당할 것이다. 여기에 안전율 2를 부여하여 일반적인 미진동 파쇄기의 제안진동식은 $V = 350 (D/W^{1/2})^{-1.228}$ 로 나타낼 수 있다.

4) 상기의 진동 제안식은 미진동파쇄기에 국한된 것이다. 미진동 파쇄기는 근거리에서의 진동 제어가 중요한 관건이므로, 약 30m이내의 지역에서는 상기식이 타당할 것이며, 진동식의 예측은 자료가 많을 수록 그 신뢰성이 높아지므로 추후 미진동 파쇄기 사용현장의 진동 계측치를 계속 반영해 나가는 작업이 필요할 것이다.

5) 동일한 거리 및 지발당 장약량 적용하여 미진동파쇄기와 Emulsion 폭약의 진동속도를 비교한 결과 미진동파쇄기는 Emulsion 폭약에 비해 평균 9.6%정도의 진동수준을 나타내는 것으로 측정되었다. 이는 미진동 파쇄기 적용시 Emulsion 폭약에 비해 약 10배 정도 진동을 줄일 수 있음을 의미한다.

과거 자료의 분석 결과로 기본적인 시험 방향을 선정하여 총 4회의 각기 다른 암석강도는 갖는 현장에서 시험을 진행하여 그 시공 방법 및 진동 특성을 규명하고자 하였다. 시공상의 문제점들은 본 시험을 통해서 그 평가 및 개선이 확실히 되었다고 말할 수 있으나, 진동 특성등은 추후 많은 사용 현장 분석을 통하여 계속 보완, 정립해 나가야 할 것이다.

참고문헌

기경철, 김일중, 2002, 산·학인을 위한 발파공학, 동화기술, 178~180, 327
 김일중, 기경철, 원연호, 2002, 일반발파와 진동제어발파에 대한 연구, 화약·발파, 20(2), 33-41
 이천식, 이운재, 김형섭, 송영석, 권오성, 2001, 뉴 화이텍카를 이용한 발파패턴 실용화 방안, 화약·발파, 19(3), 27-37
 박주연, 이천식, 윤성현, 안명석, 류창하, 2002, 미진동 발파공법 적용사례에 관한 연구, 화약·발파, 20(3), 39-48
 김영환, 안명석, 박종남, 강대우, 이창우, 2000, 도심지 미진동 제어발파에서 진동 분석을 통한 안전 발파설계에 관한 연구(II), 화약·발파, 18(2), 7-13
 건교부 암발파 설계 및 시험발파 잠정지침(안), 2003

