

석회석 광산에서 Gassed bulk emulsion (Chemical gassing)의 적용

민형동¹⁾ · 정민수²⁾ · 박윤석³⁾ · 이용소⁴⁾ · 이원욱⁵⁾

1. 서론

국내 대부분 석회석광산은 2000년도 초반까지 ANFO를 사용하여 발파작업이 이루어 졌다. 이후 Bulk Emulsion의 경제적 이점 및 안전성이 부각되면서 석회석 광산에서는 사용폭약을 ANFO에서 Bulk Emulsion으로 대체하기 시작하였다. 최근에는 기존 Bulk Emulsion의 성능을 개선하기 위한 방안으로 Chemical gassing을 도입하여 적용 중에 있으며, 기존 GMB(Glass Micro Balloon) 사용 시 보다 Toe 및 파쇄입도 개선효과, Moving 향상 등의 장점이 있는 것으로 보고되고 있다. 그러나 Gassing 실패 시 Miss Fire의 위험이 있으므로 높은 수준의 관리가 필요하다. 당사에서는 한국의 주요 석회석 광산 중 하나인 '○○양회 ○○광산'에서 Chemical gassing의 적용성을 검증하기 위해 총 8회의 시험발파를 실시하였으며, 발파효율, 작업성 등을 비교 평가하였다.

2. Bulk emulsion 폭약

2.1 Bulk emulsion 폭약의 정의

에멀전 폭약은 산화제와 연료를 계면활성제를 사용하여 유화시킨 혼합물이며, 주요조성은 질산암모늄, 물, 가연제, 유화제, 예감제 등의 혼합물로 이루어진다(그림 1). 고체상태의 질산암모늄은 에멀전 폭약의 산화제로 사용되며 물과 혼합되어 액상의 산화제 수용액을 이룬다. 물이 혼합됨으로 인해 에멀전 폭약은 둔감해지고, 내수성을 가지게 된다. 여기에 비수용성의 가연제(연료유 등)가 혼합되어 산소평형을 유지시키고 기폭감도를 높이는 역할을 한다.

-
- 1) (주)한화 화약기술팀 팀장
 - 2) (주)한화 화약기술팀 차장
 - 3) (주)한화 화약기술팀 대리
 - 4) (주)한화 보은공장 차장
 - 5) 성신양회 단양공장 대리

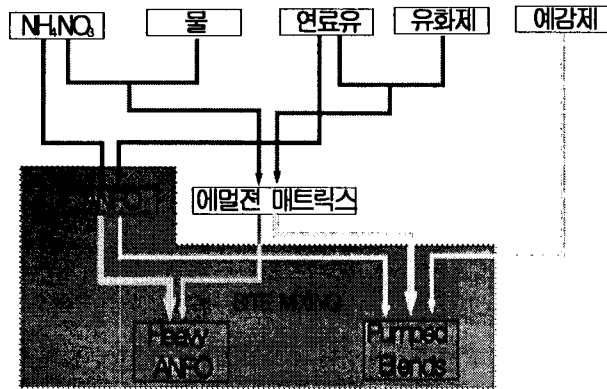


그림 1. 벌크 에멀전 폭약의 기본원리

또한 여기에 물과 가연제의 계면장력을 떨어트려 분산상을 유지하고, 골고루 섞이게 하는 유화제가 혼합되게 된다. 이렇게 완성된 에멀전 매트릭스에 기폭감도를 높일 목적으로 예감제를 추가한다. 표 1은 에멀전 폭약의 주요성분을 나타낸 것이다.

표 1. 에멀전폭약의 주요 성분

구 분	성 분	무게(%)
산화제	AN, SN, CN, SP, AP, HNO ₃ , UN	50~80
가연제	비수용성 가연물 (연료유, 왁스류)	1~10
물	H ₂ O	5~20
유화제	HLB 3~9	1~5
예감제	GMB, PMB, Gassing agent, Al powder 등	10~40 (부피%)

에멀전 폭약을 형태 및 사용상 분류하면 카트리지와 Bulk type으로 나눌 수 있으며, 카트리지 폭약의 경우 일정한 형상을 유지시키기 위해 왁스를 주요 연료 성분으로 사용하는 반면, Bulk emulsion에 사용하는 에멀전은 발파 현장에서 펌프를 통한 장약이 가능하도록 경유와 같이 점도가 작은 오일을 사용하여 액상으로 제조된다. 최근에는 에멀전과 ANFO의 혼합물을 주로 일컫고 있다. 에멀전과 ANFO의 혼합비는 혼합에 따른 효과를 얻기 위하여 20:80에서 80:20의 범위에서 이루어지고 있으며, 에멀전 함량이 60%이상으로 펌핑 가능한 Blends를 'Pumped Blends'로 분류하며(그림 1, 표 2), 한국에서는 통상 'Bulk Emulsion'이라 칭한다(Product name : HiMEX).

표 2. 에멀전과 ANFO의 혼합비에 따른 영향

Item	EM : ANFO	Resist Water	Sensitizer	Density (g/cc)	VOD (m/s)	Heat (J/g)	@1,000atm for soft rock		@2,000atm for hard rock	
							RAWS	RABS	RAWS	RABS
ANFO	0:100	poor	×	0.90	3,000	100% (3,700)	100% (2,384)	100%	100% (2,102)	100%
Heavy ANFO	20:80	poor	×	1.10	3,400	96% (3,537)	104% (2,348)	127%	106% (2,238)	130%
	30:70	short	×	1.18	3,500	93% (3,435)	104% (2,483)	136%	108% (2,265)	142%
	40:60	moderate	×	1.27	3,700	90% (3,339)	105% (2,511)	148%	110% (2,315)	155%
	50:50	good	◎	1.25* (1.20')	3,800 (5,500)	87% (3,227)	101% (2,401)	140%	105% (2,205)	146%
Pumped Blends	60:40	excellent	◎	1.25* (1.20')	5,300 (5,800)	84% (3,125)	98% (2,327)	136%	102% (2,134)	142%
	70:30	excellent	◎	1.25* (1.20')	5,500 (5,800)	82% (3,019)	94% (2,251)	131%	98% (2,059)	136%
	80:20	excellent	◎	1.25* (1.20')	5,900 (5,900)	79% (2,919)	91% (2,178)	126%	95% (1,991)	132%
Straight EMX	100:0	excellent	◎	1.25* (1.20')	5,900 (6,200)	73% (2,710)	85% (2,025)	118%	88% (1,848)	122%

2.2 Bulk emulsion 폭약의 예감화

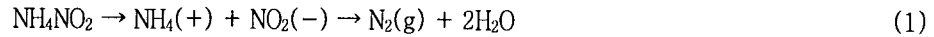
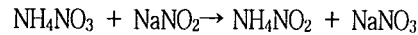
에멀전 매트릭스는 액상 또는 반고체상으로 비압축성 유체로 볼 수 있다. 따라서 뇌관이 나 프라이머로부터 오는 강력한 쇼크에도 반응에 필요한 충분한 온도까지는 상승하지 못한다. 그러나 에멀전 매트릭스에 기체를 분산시킨 후 쇼크를 주면 기체가 순간적으로 단열 압축되면서 온도가 상승한다. 이때 고온의 기체와 접촉한 응축상의 표면 성분부터 활성화하기 시작하여 산화 반응이 사방으로 전파되며, 폭약의 기폭감도는 크게 향상된다. 이러한 이론(Hot spot 이론)에 근거하여 폭약의 기폭감도를 높여주는 역할을 해주는 물질을 예감제라 한다. 에멀전 기체 폭약에 사용하고 있는 예감제는 GMB, PMB, Chemical gassing agent, ANFO (또는 프릴 초안), Perlite, EPS 등이 있으며, ANFO 또는 프릴 초안을 예감제의 전부 또는 일부로 사용한 에멀전 기체 폭약이 바로 Emulsion Blends이다. 한편, 표 2와 같이 Emulsion Blends에서 에멀전의 함량이 50%를 초과하면 초안 입자간 거리가 점점 멀어져 단위 부피당 Hot-spot 양이 부족하게 되므로 에멀전에 별도의 예감제를 혼합해 주어야 원하는 정도의 기폭 감도를 얻을 수 있다.

3. CHEMICAL GASSING

3.1 Chemical gassing의 원리

상기 기술한 바와 같이 에멀전 함량이 50% 이상인 Emulsion blends에서는 감도가 크게 떨어지기 때문에, 별도의 예감제로 GMB, PMB, Gassing agent등을 혼합해 주어야 한다. GMB

및 PMB는 폭약을 물리적으로 예감화하는 반면, Gassing agent는 폭약을 화학적으로 예감으로 예감화 방법(Chemical gassing)에 사용된다. 따라서 GMB 및 PMB는 제조/관리상의 편리함 때문에 종래의 카트리지 및 Bulk emulsion 폭약의 예감제로 주로 사용되었다. 그러나 Bulk emulsion이 주종을 이루는 선진국에서는 발파위력 향상을 위해 제조/관리상의 어려움에도 불구하고 Gassing agent를 예감제로 사용하고 있으며, 이러한 관점에서 당사도 Chemical gassing 기술을 도입하였다. Gassing agent의 종류로는 EGA, APX, RLX 등이 있으며, 현재 국내 현장에서 사용되는 Gassing agent의 유효 성분은 Sodium nitrite(NaNO_2)이다. 아래 식 1과 같은 반응식으로 매트릭스 내에서 질소가스를 발생시킨다.



이때 발생된 질소가스에 의해 최초 장약 후 장약칼럼이 팽창하게 되며(20~30(%)), GMB와는 달리 압축성 기체이기 때문에 상부 장약하중의 영향으로 압축을 받게 되어, 장약 상, 하부의 밀도차가 발생하게 된다(그림 2).

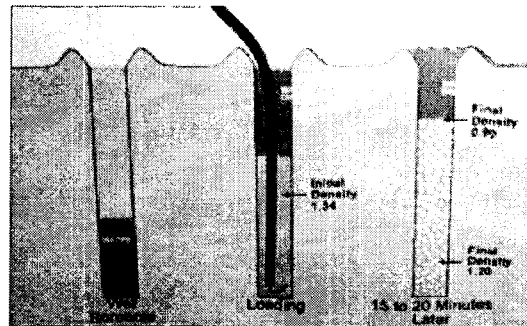


그림 2. Gassing process 모식도

3.2 Chemical gassing의 특징

발파효율

Chemical gassing 적용 시 이론적인 에너지의 향상은 약 5%이며, 장약 후 장약 칼럼의 팽창 및 상, 하부 밀도 차에 의한 발파효과는 다음과 같다.

- 1) 장약 후 장약 칼럼의 팽창으로 인한 상부 장약장 증가로 파쇄도 개선(팽창률 : 약 20~30(%))
- 2) 상부 장약하중에 의한 Gas bubble 의 압축으로 하부 밀도증가가 증가되며, 이로 인한 발파위력 증가로 Toe의 개선
- 3) 에너지의 효율적인 분배(상부장약 : 저밀도, 하부장약 : 고밀도)로 인한 전체 발파효율 향상

- 4) 현장 암질(강도 등)에 적합한 폭약을 현장에서 직접 제조함으로써 암질변화에 능동적으로 대처 가능

엄격한 밀도관리 요구

Chemical gassing 적용 시 상부 장약하중의 영향으로 장전 깊이에 따라 밀도 차이가 발생한다. 이것은 발파 효율상 에너지가 많이 필요한 공저의 장약 밀도를 높이는 장점이 있으나, 임계밀도(약 1.35g/cc 부근)를 넘게 되면 공저 장약의 불폭 현상을 야기할 수 있다. 따라서 철저한 밀도 관리가 필요하다.

Gassing 시간의 조절

Chemical gassing의 경우 Gassing agent, Acid 함량 및 외부온도 등에 의한 영향이 커 가스 발생속도의 조절이 매우 어렵다. 따라서 현장 적용 시 화학 제조업체의 Gassing 숙련자에 의한 작업이 이루어져야 한다(그림 3).

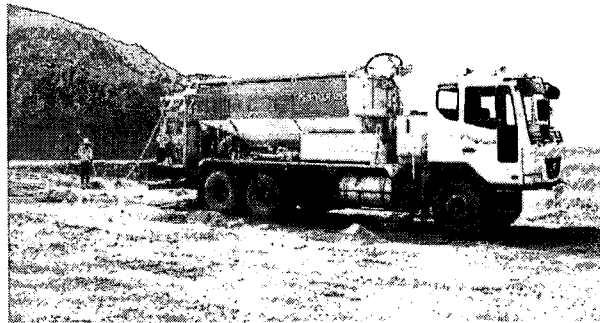


그림 3. Gassing 숙련자에 의한 작업 전경

장약 후 대기시간

한국의 현장 여건상 대기 시간은 가능한 한 짧은 것이 좋다(30분 이내). 그러나 가스 발생속도가 너무 빠르면, 트럭 내 혼합 과정 중 또는 장약호스 안에서 부풀어 오르게 되고, 부풀어 오른 상태에서 에멀전이 변형되면 Gas bubble이 응집하여 손실된다. 따라서 가스 발생속도는 최소 10분 이상은 되어야 한다.

3.3 Chemical gassing 적용을 위한 모의시험

Chemical gassing 적용 시 장약칼럼의 팽창율 및 팽창속도는 Gassing agent 및 Acid 함량에 따라 변화하며, 외부 온도에 따라 영향을 받기도 한다. 이러한 영향을 검증하기 위해 모

의시험이 수행되었으며, 주요내용은 아래와 같다. 모의시험에 사용된 재료는 102mm 아크릴 파이프로, 현장에서 적용중인 공경과 동일하게 적용하였다.

밀도 및 팽창률 변화

ANFO 평균 밀도는 0.75~0.85(g/cc)이며, HiMEX-GMB의 평균밀도는 1.20~1.25(g/cc)의 범위이다. 그러나 HiMEX-Gassing의 경우 최초 장약밀도는 1.32~1.34(g/cc) 정도로 고밀도이다. 이후 Gassing agent의 반응에 따른 장약칼럼의 팽창으로 하부는 1.25~1.30(g/cc), 상부는 0.9~1.05(g/cc) 정도로 밀도차가 발생하게 되며, 팽창률은 약 20% 정도에 이른다. 이러한 밀도 및 팽창률의 변화는 Gassing agent의 함량에 따라 가변된다. 아래 그림 4에 각각의 폭약을 비교하여 나타내었다. 최초 동일한 장약장(50cm)에서 관찰결과, 30분 후 ANFO 및 HiMEX-GMB의 경우 변화가 없으나, HiMEX-Gassing의 경우 10cm 정도(20%) 팽창함율(최종 높이 60cm) 확인할 수 있다.

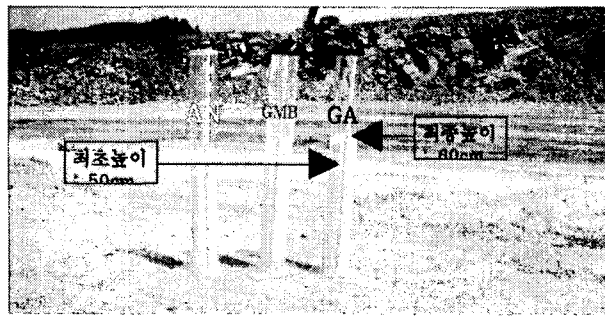


그림 4. 각 폭약의 팽창률 비교

Acid 함량 조절시 팽창속도 변화

Acid 함량 조절시 팽창속도의 변화를 확인하기 위해 Gassing agent를 0.4%로 고정시키고, Acid 함량을 0.2~0.6(%)까지 증가시키며, Gassing 속도를 관찰하였다. 그림 5에 그 결과를 도시하였다. Acid 함량의 증가에 따라 Gassing 속도는 증가하는 양상을 보였으며, 20분 이후는 거의 Gassing이 완료된 상황을 볼 수 있다.

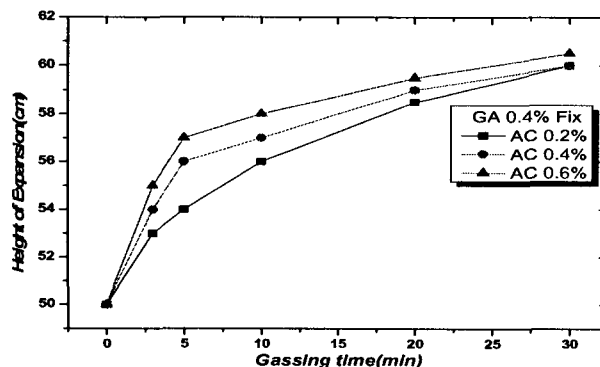


그림 5. Acid함량 변화에 따른 Gassing 속도

그러나 Gassing 속도가 지나치게 빠르면 Gas bubble의 균질성이 저하되어 폭약의 위력이 저하되고, 장약장비 내에서 급격히 팽창하여 장약호스의 막힘 현상 등이 발생할 수 있으므로 주의가 필요하다.

Gassing agent 함량 조절시 팽창률 변화

Gassing agent 함량 조절시 팽창률의 변화를 확인하기 위해 Acid를 0.4%로 고정시키고, Gassing agent를 0.4%~0.6%까지 증가시키며, 팽창률을 측정하였다. 아래 그림 6 및 그림 7에 그 결과를 나타내었다.

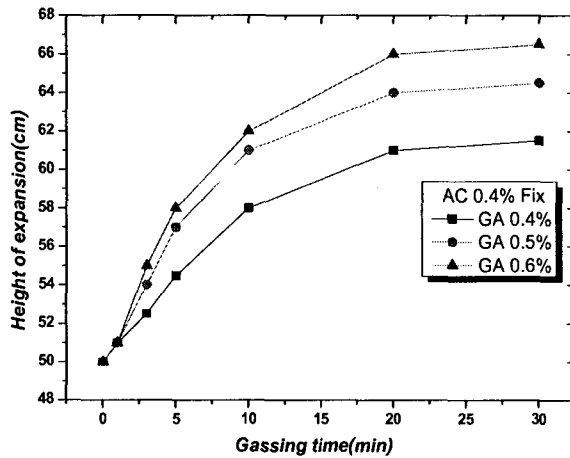


그림 6. Gassing agent 함량에 따른 팽창률 변화

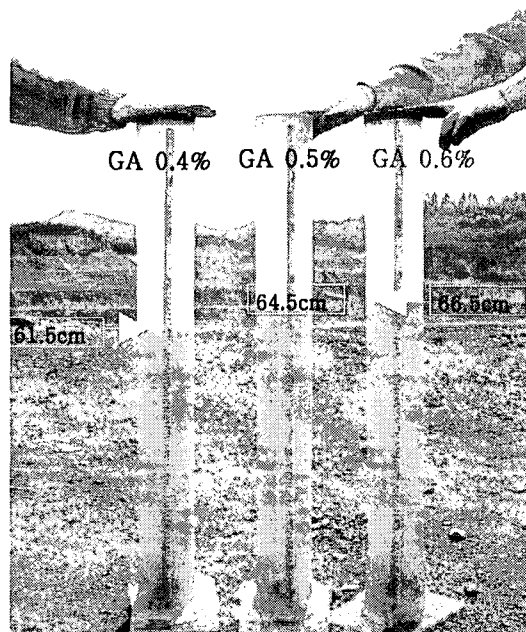


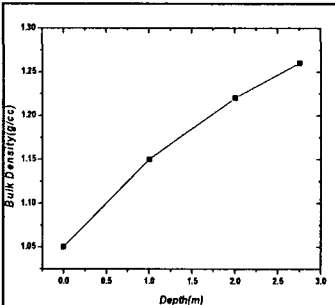
그림 7. 팽창률 변화 모의시험 전경

장약심도에 따른 밀도의 변화

Chemical gassing 적용 시 상, 하부의 밀도차를 확인하기 위해 직경 $\varnothing 102\text{mm}$, 길이 3m의 아크릴 파이프를 제작하여, 바다, 중간 및 상부에서 밀도차이를 측정하였다. 이때 Acid 및 Gassing agent 함량은 각각 0.4%를 적용하였으며, 측정시간은 장약 30분후 이다. 아래 표 3에 그 결과를 나타내었다.

표 3. 장약심도에 따른 밀도차

장약깊이 (m)	밀도 (g/cc)
0.00 (바다)	1.270
1.00	1.220
2.00	1.150
2.75 (최상부)	1.050



측정결과 최상부에서는 1.05g/cc로 측정되었으며, 바다에서는 1.27g/cc로 측정되어 상, 하부의 밀도차를 확인 할 수 있었다. 또한 이와 동시에 팽창률을 측정하였으며, 그 결과를 그림 8 및 그림 9에 나타내었다. 측정결과 초기높이 2.3m에서 최종높이 2.75m로 약 20% 팽창함을 확인 할 수 있었다.

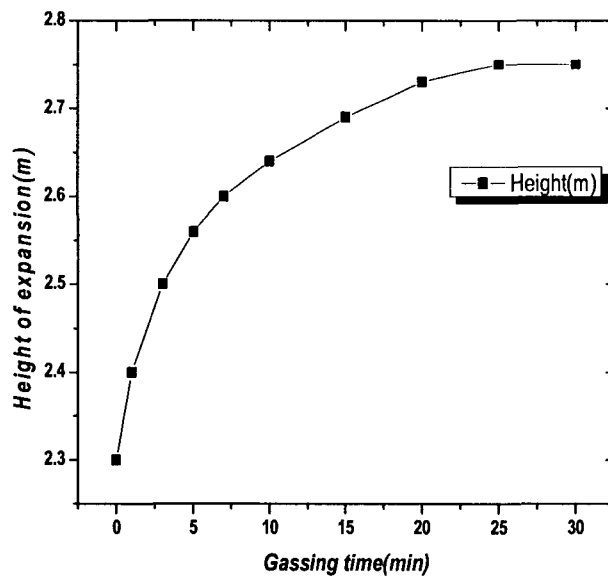


그림 8. Gassing 시간에 따른 팽창률 변화

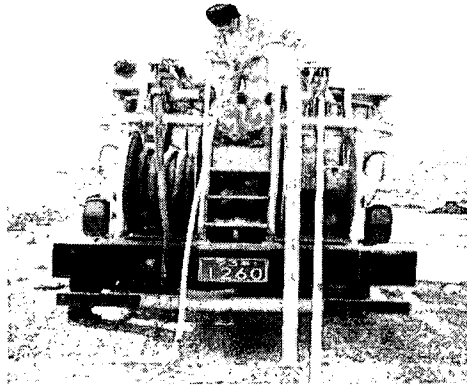


그림 9. 밀도 및 팽창률 변화 측정시험 전경

4. 현장 적용시험

4.1 시험현장 개요

현장시험은 국내 대표적인 석회석광산인 ○○양회 ○○광산에서 실시되었으며, 아래 표 4에 시험현장의 대표적인 물리적 특성을 나타내었다. 표 4에서와 같이 시험 현장의 암석은 경암에 해당되며, 대부분 시멘트 원료용으로 채광되고 있다. 전형적인 벤치발파를 실시하고 있는 현장이며, 그림 10에 현장 전경을 나타내었다.

표 4. 시험현장 암반의 물리적 특성

Spec. ID.	Density (gr/cm ³)	P-wave Velocity (m/sec)	Uni. Comp. Strength (kgf/cm ²)	Young's Modulus (10 ⁵ kgf/cm ²)
1S	2.68	4,500	1,210	5.234
2S	2.70	5,230	1,330	5.227
3S	2.79	4,990	1,051	5.698
4S	2.67	5,035	1,069	5.324
5S	2.71	4,930	1,155	5.247

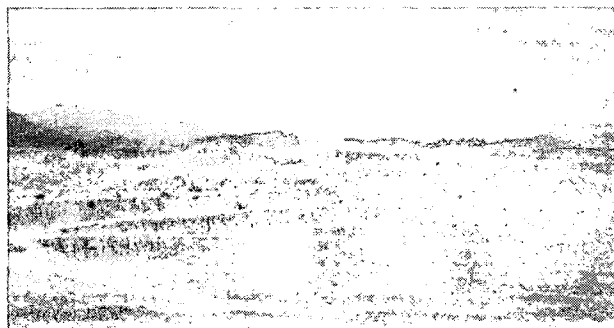


그림 10. 시험현장 전경

4.2 시험발파 패턴

Chemical gassing의 적용성을 평가하기 위해 총8회에 걸쳐 시험발파를 실시하였으며, 그에 따른 발파효율(파쇄도, Moving등), 작업성 및 환경성에 대한 부분을 종합적으로 검토하였다. 표 5는 현장 시험발파 패턴을 나타낸 것이다.

- ▣ 시험발파 장소 : ○○양회 ○○광산
- ▣ 시험발파 일시 : 2007. 5/9~5/11(총8회)

표 5. 시험발파 패턴

Item	HiMEX-GMB vs HiMEX-Gassing Agent							
	HiMEX-GMB/GA Comparative Tests					GMB	HiMEX-GA	
Explosives								
Test No.	T-1	T-2	T-3	T-4	T-5	T-6	T-7	T-8
Bench height(m)	13.5	15.5	14.5	15.0	15.0	9.0	15.0	15.0
Drilling length(mm)	15.0	17.0	16.0	16.5	17.0	10.5	16.5	16.0
Hole diameter(mm)	102	102	102	102	102	89	102	102
Hole no.(hole)	17	14	19	21	20	20	11	14
Burden(m)	4.6	4.8	4.8	4.8	4.8	4.0	4.8	4.1
Hole space(m)	5.1	5.1	5.1	5.1	5.1	4.5	5.1	5.1
Specific charge(kg/m ³)	0.341	0.336	0.331	0.334	0.347	0.346	0.334	0.337
Specific drilling(m/m ³)	0.047	0.045	0.045	0.045	0.046	0.065	0.045	0.058

* GA : Gassing Agent

4.3 시험발파 결과

발파효율

(1) Moving 및 Heaving

작업효율성을 판단하는 자료중 하나로, 파쇄석의 Moving 및 Heaving을 들 수 있으며, 파쇄도와는 별개로 암석이 파쇄 후 분포된 상태는 버럭처리 시간 및 상차의 용이성에 영향을 미친다. 비교 시험발파 결과 Chemical gassing 적용 시 Moving 및 Heaving이 개선된 것으로 나타났다. 이러한 원인은 Chemical gassing 적용 시 공내 밀도차의 발생으로 인해 하부 장약 밀도가 증가하고, 이에 따라 발파위력이 증가하기 때문으로 판단된다. 표 6 및 그림 11은 비교시험 결과를 보여주고 있다. 전체적으로 Chemical gassing 적용 시 암반의 이동 및 파쇄도가 개선된 것으로 판단되었으나, 보다 객관적인 자료 도출을 위해 파쇄도 분석 프로그램을 이용한 파쇄도 분석결과를 다음 장에 제시하였다.

표 6. Moving and Heaving 비교(HiMEX-GMB vs HiMEX-Gassing agent)

Item	HiMEX-GMB vs HiMEX-Gassing Agent											
	GMB		GA		GMB		GA		GMB		GA	
Explosives	GMB		GA		GMB		GA		GMB		GA	
Test No.	T-1		T-2		T-3		T-4		T-5			
Moving(m)	20~32	25~30	24~28	24~32	22~29	24~28	28~30	24~32	19~28	22~33		
Heaving(m)	4.5~7.0	5.0~8.4	3.4~5.2	4.8~5.4	3.9~6.7	4.2~7.1	3.8~5.4	4.4~6.2	4.5~5.2	4.7~5.8		

* GA : Gassing Agent

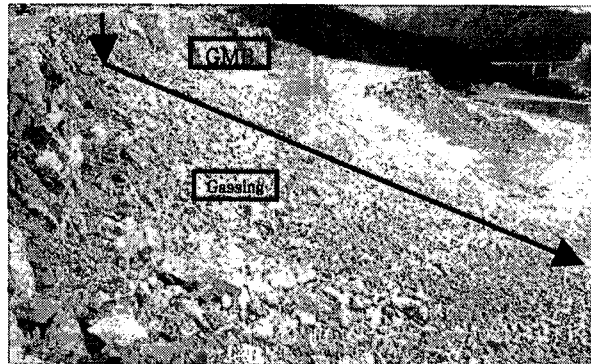


그림 11. 비교 시험 전경

(2) 파쇄도 분석

각 시험발파를 통해서 얻어진 파쇄석을 Split-Desktop 2.0을 이용하여 파쇄도를 분석하였다(표 7, 그림 12). 기존 예감제로 사용되던 GMB를 Chemical gassing 기술을 적용하여 Gassing agent로 대체 시 비교 시험발파 결과에 의하면 평균파쇄입도는 각각 평균 28.5cm 및 27.3cm로 나타나 Chemical gassing(Gassing Agent) 적용 시 추가적인 파쇄입도 향상을 기대할 수 있을 것으로 판단된다. 이러한 원인은 Chemical gassing (Gassing Agent) 적용 시 공내 장약칼럼의 팽창으로 인한 상부 장약장 증가로 장약 상부에서 대피의 발생량이 감소하였기 때문으로 판단된다.

표 7. 파쇄도 분석결과(HiMEX-GMB vs HiMEX-Gassing Agent)

Item	HiMEX-GMB vs HiMEX-Gassing Agent											
	T-1		T-2		T-3		T-4		T-5			
Explosives	GMB		GA		GMB		GA		GMB		GA	
P ₅₀ Size(cm)	28.3	27.5	25.3	23.1	29.7	31.0	27.7	25.5	31.7	29.2		
Average	GMB : 28.5cm, GA : 27.3cm											

적인 관찰이 필요할 것으로 판단된다.

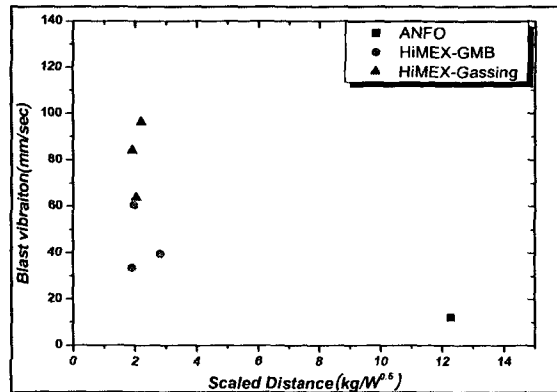


그림 13. 발파 진동속도 비교

5. 결 론

본고에서는 한국의 대규모 석회석광산에서 성공적으로 Chemical gassing을 적용한 사례를 소개하였다. 기존 예감제로 사용되는 GMB를 Chemical gassing 기술을 적용하여 Gassing Agent로 대체 시 파쇄도 및 Toe개선 효과와 Moving의 향상을 확인 할 수 있었다.

현재 국내 대규모 석회석광산은 기존 예감제로 GMB를 사용하는 Bulk Emulsion을 Chemical Gassing 제품으로 변경하여 적용중이며, 점차적으로 사용현장이 늘어가는 추세이다.

참고문헌

1. 벌크 에멀전(HiMEX)폭약의 현장시험 보고서, 2003, 한화.
2. HiMEX Chemical gassing 평가결과 보고서, 2007, 한화.
3. The modern technique of rock blasting, 1978, U. Langefors and R. Kohlstrom.
4. Rock blasting, effects & operations, 2006, Pijush Pal Roy.