

에멀전 폭약의 수직 장공 장약 시 낙하 충격에 의한 성능 영향

이영호¹⁾, 이승찬^{1)*}, 이응소¹⁾

The Effect of Performance on Loading Impact of Emulsion Explosive in Long Vertical Borehole

Young-Ho Lee, Seung-Chan Lee and Eung-So Lee

Abstract : When emulsion explosives(1kg/cartridge) are loaded into a long vertical borehole at open blasting site, they undergo an impact corresponding to 117.6J of shock energy. After shocking, the crystallization of emulsion may happen immediately. Furthermore, it may cause a desensitization, arising from increase in the density of emulsion explosive by the breakage of sensitizer. In this paper, some experimental work was performed using PVC pipe equipment(50mm diameter and 12m lengths) to investigate the effects of loading impact of emulsion explosive. It is shown that detonation energy decreases up to 26% of the normal state value and this effect is less than 3% of the total performance of emulsion explosives in borehole blasting.

Key words : emulsion explosives, long vertical borehole, loading impact, performance change

초 록 : 수직으로 12m 천공된 노천발파 현장에서 분당 1kg의 에멀전 폭약을 자유낙하 하여 장약하면 117.6J의 낙하충격 에너지가 발생한다. 에멀전이 강한 외부의 충격을 받으면 과포화 상태로 불연속상을 형성하고 있는 산화제 수용액 입자가 서로 뭉쳐서 결정으로 석출되고, 예감제의 일부가 파괴되어 비중이 상승된다. 산화제 수용액이 석출되어 에멀전이 파괴되거나, 에멀전 폭약의 비중이 높아지면 폭속 및 기폭감도가 저하된다. 본 연구에서는 직경 75mm, 길이 12m의 PVC 파이프를 수직과 70°각도로 세우고, 약경 50mm 에멀전 폭약을 낙하하여 충격에 의한 성능 변화를 평가하였는데 폭평 에너지는 최대 26%까지 감소하나 전체 발파공에서 발파효율에 미치는 영향은 3% 이내인 것으로 조사되었다.

핵심어 : 에멀전폭약, 수직장공, 낙하 충격, 성능 변화

1. 서 론

노천 벤치(bench) 발파의 경우 대규모 장비의 활용을 위한 작업 공간 확보가 용이하므로 발파효율을 극대화 하기위해 장공발파를 실시한다. 수직 장공에 에멀전폭약(이하 EMX)를 장약하면 낙하 충격에 의해 날본이 파손되어 에멀전 및 예감제 일부가 파괴된다. 에멀전은 산화

제 수용액이 불연속상을 형성하고, 연료성분이 연속상을 이루고 있는 물리적으로 매우 불안정한 상태이다. 불연속상인 산화제 수용액은 10 μ m 이하의 매우 미세한 크기로 연속상 속에 분산되어 있으므로 상온에서 과포화상태로 존재하지만, 외부의 충격을 받으면 분산된 입자끼리 서로 뭉쳐 액적이 커지고 산화제가 결정으로 석출된다. 주로 질산암모늄(ammonium nitrate, NH₄NO₃)용액 상태로 EMX에 존재할 경우 생성열(heat of formation)이 -81.10kcal/mole 이지만, 결정으로 석출되면 -87.27kcal/mole이 되어 폭약의 에너지가 약 7% 정도 감소된다. 산화제의 석출은 산화제와 연료

1) (주)한화 보은공장

* Corresponding author : i8708405@hanwha.co.kr

접수일 : 2007년 5월 15일

게재승인일 : 2007년 6월 23일

성분의 인접성을 떨어뜨려 산화반응속도가 느려지며 이는 EMX의 기폭감도와 폭속의 저하로 나타난다(한화, 2006).

이상 폭굉(ideal detonation)은 폭약이 가진 모든 에너지가 폭굉 반응 영역(detonation reaction zone) 내에서 발생하며 암석의 파괴와 이동에 대부분의 에너지가 사용된다. 이상 폭속(ideal detonation velocity)은 해리스의 식(Harries's equation)으로 계산되며 폭약의 에너지와 비중의 함수이다(Harries, 1977).

$$D = k\sqrt{Q(1+1.33\rho)} \quad (1)$$

위 식에서

D = 폭굉 속도(detonation velocity, m/s)

Q = 반응열(heat of reaction, J/kg)

ρ = 비중(specific gravity of the explosive, g/cc)

k = 상수(약 1.15)

에멀전과 예감제가 부분적으로 파괴되면 비이상 폭굉(non-ideal detonation)이 진행되어, 충격 에너지(shock energy) 및 유효 에너지(available energy)가 감소한다. 수직 장공에서 장약 시 낙하 충격에 의해 EMX의 폭속이 변한 경우 이를 계산된 이상 폭속으로 나누면 이상도(degree of ideality)를 구할 수 있다.

EMX를 12m 높이의 수직공에 장약하여 중기폭으로 발파를 하였을 때 공저부에 가끔 잔류약이 발생한다는 보고가 있었다. 본 연구에서는 PVC

파이프로 12m 높이의 장약공을 만들고 90° 및 70° 각도에서 5종의 EMX를 낙하하여 충격을 준 후 각종 성능시험을 실시하였으며, 낙하충격을 받은 EMX의 이상도를 계산하였다.

2. 시료 및 시험방법

2.1 시료의 종류 및 성능

시험에 사용한 시료는 약경 50mm 제품 5종이며, 각각의 성능을 표 1에 나타내었다. 제품 B와 C의 경우는 포장재질에 따라 지포장 제품과 필름포장 제품으로 구분하였다. 35mm 강관 내에 장전 조건(구속 조건)에서 각 시료의 폭속은 5500~6100(m/sec)로 이상 폭속(ideal velocity)에 근접한 값을 나타내었다. 파괴전압(broken voltage: 이하 BV)은 두 전극사이에 에멀전을 놓고 전압을 변화시켜 통전이 되는 전압을 의미한다. 에멀전의 연속상은 부도체이고 불연속상은 전도체이므로 에멀전이 잘 형성 될수록 파괴전압 값이 높아진다. 반면 에멀전이 충격을 받아 불연속상이 결정으로 석출되면 전도체가 되므로 파괴전압 값이 낮아진다. 에멀전 제조시 유화제의 종류 및 조성에 따라 BV 값이 서로 다르지만 일반적으로 정상적인 에멀전의 BV는 200V 이상이다.

침입도(penetration: 이하 PT)는 원뿔 모양의 추를 일정 높이에서 EMX에 떨어뜨려 약 속으로 추가 들어간 깊이를 측정된 값이다. 약상이 무르면 PT값이 크고 단단할수록 값이 낮아진다. 그림 1에 침입도 측정 장치를 나타내었다.

표 1. 시료의 종류 및 낙하충격 전 성능

구분	날본 폭속(m/s)		강관폭속(m/s)	이상폭속(m/s)	BV(V)	PT(mm)	
	상온	-20℃			표면		
A(지포장)	5352	4975	6048	6140	227~472	10.4	
B	지포장	5347	4784	5961	5880	960~1068	13.3
	필름포장	5917	5952	5848	5880	862~1054	15.5
C	지포장	5263	4830	5747	5799	742~860	12.6
	필름포장	5434	5494	5714	5799	736~856	13.4

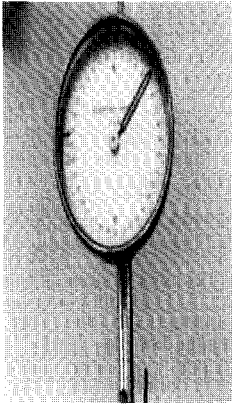


그림 1. 침입도계(Penetration Tester).

2.2 시험방법

직경 75mm, 길이 12m의 PVC 파이프를 준비하고, 수직으로 세웠을 때 PVC 파이프가 휘지 않도록 ‘ㄱ’형관으로 외부를 보강한다. PVC 파이프 하단에 가로 60mm, 세로 800mm 크기의 시료 설치/채취용 구멍을 내고, 파이프 내부에 길이 25m의 낙하산 줄을 설치한다. 방폭벽으로 구획된 시험장에 PVC 파이프 고정 장치를 설치하고, 크레인으로 파이프를 들어올려 90°로 고정한다. 낙하산 줄에 시료를 묶어 시료 설치/채취용 구멍에 넣

은 후 방폭벽 뒤에서 낙하산 줄을 잡아당겨 파이프 상부로 시료를 끌어 올린다. 이 후 낙하산 줄을 놓아 시료를 자유낙하 시킨다. 시료 설치/채취용 구멍에서 낙하된 시료를 꺼내고, 두 번째 시료를 설치하여 동일한 방법으로 시험을 실시한다. 90°에서 낙하시험이 종료된 후 PVC 파이프를 70°로 눕혀 고정하고, 동일한 방법으로 각 시료별 낙하시험을 실시한다. 그림 2에 수직 낙하(90°) 시험 장치를 나타내었다.

2.3 90° 경사에서 낙하한 시료의 성능

그림 3에 낙하 충격에 의해 손상을 입은 낱본의 사진을 나타내었으며, 표 2는 90°에서 낙하된 시료들의 손상된 비율과 정상비율을 나타내었다.

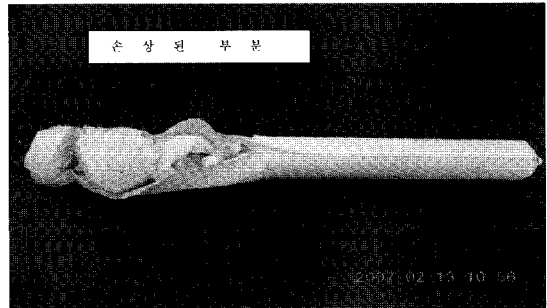


그림 3. 낙하충격에 의해 손상을 입은 낱본.

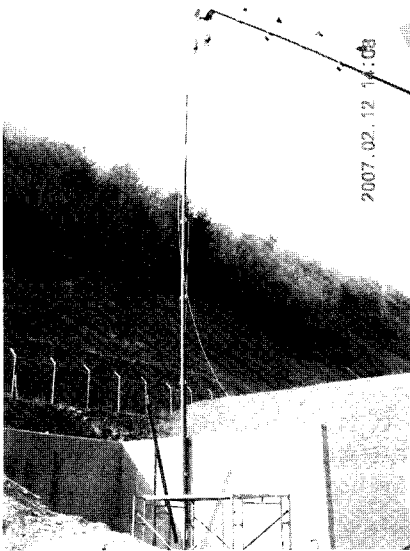


그림 2. 90° 낙하시험 장치.

포장재질별로 손상비율을 비교해보면 B 제품에서 필름 포장 제품은 전체 길이의 약 45%가 낙하 충격에 의해 손상을 입은 반면, 지포장 제품은 전체 길이의 약 38% 만이 손상을 입었다. C 제품에서 필름 포장 제품은 전체 길이의 약 31%가 낙하 충격에 의해 손상을 입은 반면, 지포장 제품은 전체 길이의 약 18% 만이 손상을 입었다. 전반적으로 같은 제품군에서 필름포장 제품이 지포장 제품보다 더 많이 손상을 입었다. 제품별로 비교해 볼 때 C 제품보다 B 제품이 더 많이 손상을 입었다. 이는 C 제품과 B 제품의 PT 측정치로 비교해보면 B 제품은 지포장이 13.3mm, 필름포장이 15.5mm이며 C 제품은 지포장이 12.6mm, 필름포장이 13.4mm로 PT 측정치가 작은 C 제품이 약상이 딱딱하다는 의미이며, 낙하시 약상이

더 딱딱한 쪽이 하부 일부만 충격을 받는 것으로 보인다. 지포장 A는 C제품보다 더 딱딱하지만 낙하 충격을 더 많이 받아 손상부분이 많이 발생하

었는데 이는 B와 C 제품과 다른 약 내부 고품몰이 많은 제품 특성 때문으로 추정된다.

표 2. 90°, 낙하 시료의 정상비율

시료구분	손상된 부분		정상 부분		
	5분 평균(cm)	비율(%)	5분 평균(cm)	비율(%)	
A(지포장)	16.0	39	25.0	61	
B	지포장	14.6	38	23.4	62
	필름포장	21.2	45	25.8	55
C	지포장	7.0	18	31.0	82
	필름포장	14.6	31	31.4	68

각 제품의 이상도는 강관 폭속 기준으로 낙하충격 시험전의 경우에는 98.5~101.4(%)로 거의 이

상적으로 폭핑이 되었다. 표 3에 이상도를 나타내었다.

표 3. 90°, 12m 낙하 시료의 이상도(기준 : 강관 폭속)

시료구분	시 험 전	시 험 후		
		손상된 부분	정상 부분	
A(지포장)	98.5 %	89.4 %	95.8 %	
B	지포장	101.4 %	98.7 %	102.4 %
	필름포장	99.5 %	97.7 %	93.9 %
C	지포장	99.1 %	86.2 %	96.9 %
	필름포장	98.5 %	96.8 %	98.0 %

그리고 90°에서 낙하 충격을 받은 시료의 손상된 부분을 따로 분리하여 폭속을 측정한 결과 날본 폭속이 다소 낮아졌으나 모두 8호 뇌관으로 정상기폭 되었다. 따라서 잔류약의 발생 원인은 낙하충격에 의한 것이라기보다는 절리나 암반 내 지하수의 연결에 의한 사암 발생, 공내 화약칼럼 중간에 암분의 침투 또는 부적절한 기폭방법 등의 이유 때문인 것으로 추정된다(Udy, 1995). 표 4에 90°에서 낙하된 시료의 폭속을 나타내었다.

강관 장전 조건에서 손상된 부분의 폭속은 시험

전 폭속 대비 87~98(%) 수준이었으며, 날본 조건에서는 70~97(%) 수준 이었다. 손상된 부분의 이상도는 89~99(%)로 시험 전 정상시료의 이상도 보다 약 2~13(%) 정도 감소하였다. 낙하 후 정상부분의 이상도는 94~102(%)로 시험 전 보다 약 1~5(%) 정도 감소하였다. 따라서 90° 각도의 12m 높이에서 낙하하여 충격을 받은 EMX는 8호 뇌관에 의해 기폭되는 감도를 유지하지만, 이상폭핑에서 벗어나 폭속이 낮아지고 유효 에너지(available energy)가 다소 감소됨을 알 수 있다.

표 4. 90°, 12m 높이 낙하 시료의 폭속 측정 결과

시료구분		강관 폭속(m/s)		날본 폭속(m/s)
		손상된 부분	정상 부분	손상된 부분
A(지포장)		5489	5882	4972
B	지포장	5802	6024	5208
	필름포장	5747	5524	4166
C	지포장	5000	5617	4784
	필름포장	5556	5681	4878

90°에서 낙하충격을 받아 손상된 부분은 비중이 0.05~0.20(g/cc) 정도 증가 하였으며, 낙하 후 정상부분은 비중 변화가 없었다. 따라서 낙하 충격에 의해 예감제가 파손되는 비율은 매우 낮았으며, 한계 비중(critical density) 이상으로 비중이 증가하지 않으므로 8호 뇌관에 의한 기폭감도를 유지 하였다. 90°, 12m 높이에서 낙하된 시료의 폭속이 감소하고, 이상도가 줄어드는 이유는 주로 예멀전의 부분적인 파괴(산화제 수용액의 결정화)

에 의한 비이상 폭굉 때문인 것으로 판단된다. 낙하 충격에 의해 손상된 부분의 파괴전압은 표면이 최소 10V 대로 측정되어 예멀전이 완전히 파괴된 것을 알 수 있으며, 단면 부분도 시험 전에 비해 상당히 많이 감소되었음을 알 수 있다. 침입도의 경우 낙하충격에 의해 손상된 부분은 7mm 미만으로 측정되어 표면의 산화제 수용액이 결정으로 완전히 석출되었음을 알 수 있다. 표 5에 90°에서 낙하된 시료의 비중, BV 및 PT를 나타내었다.

표 5. 90°, 12m 높이 낙하된 시료의 비중, 파괴전압 및 침입도

시료구분		비중(g/cc)		손상된 부분 BV(V)		손상된 부분 PT(mm)
		낙 하 전	낙 하 후	표면	단면	
A(지포장)		1.210	1.215	3~39	4~239	6.5
B	지포장	1.220	1.235	4~566	230~697	7.0
	필름포장	1.220	1.240	2~442	317~588	6.1
C	지포장	1.220	1.230	4~15	3~499	4.6
	필름포장	1.220	1.235	10~470	338~551	5.8

2.4 폭굉 에너지 및 비중 변화와 폭속 변화의 관계

Lownds(1992)에 의하면 폭굉 에너지가 10% 감소되기 위해서는 폭속이 5% 정도 감소되어야 하고, 폭약의 비중이 10% 감소하면 폭속이 6% 감소된다. 역으로 폭속이 10% 변하면 폭굉 에너지나 비중이 약 20% 변했음을 의미한다. 이를 근거로 90°, 12m 높이에서 낙하되어 손상된 시료의

폭굉 에너지 감소율을 계산해 보면 다음과 같다.

제품 B와 C의 필름포장품은 폭속이 2% 정도 감소했으므로 폭굉 에너지가 4% 감소되었다. 제품 B 지포장품은 폭속이 3% 감소했으므로 폭굉 에너지가 6% 정도 감소되었다. 제품 A는 폭속이 8% 감소했으므로 폭굉 에너지가 16% 정도 감소되었으며, 제품 C 지포장품은 폭속이 13% 감소했

으므로 폭굉 에너지가 26% 정도 감소되었다. 제품 C 지포장품의 경우 손상된 부분의 폭굉 에너지가 상대적으로 많이 감소된 것으로 나타났지만, 손상된 부분의 비율(표 2 참조)은 제일 작으므로 전체 폭약 공에서 에너지가 감소되는 정도는 시료 별로 별 차이가 없는 것으로 검토 되었다. 12m 높이의 수직공에서 약경 50mm EMX를 자유낙하로 장전하는 경우 낙하충격에 의해 손상되는 부분은 최하단 날본의 50% 미만이므로 전체 폭약칼럼(장약장 9m)에서 손상부분의 비율은 약 3% 내외로 매우 적다. 손상된 부분도 에너지가 다소 감소할 뿐 정상적으로 기폭이 되므로 장전 시 낙하충격이 전체 발파효율에 미치는 영향은 매우 미미하다고 판단된다. 표 6에 폭굉 에너지 및 비중 변화와 폭속 변화의 관계를 나타내었다.

표 6. 폭굉 에너지 및 비중 변화와 폭속 변화의 관계

For a 10% decrease in	VOD decrease by
Energy released in detonation	5 %
Explosive density	6 %

2.5 70° 경사에서 낙하한 시료의 성능

필름포장 제품을 비교해보면 B 제품은 전체 길이의 약 33%가 낙하충격에 의해 손상을 입은 반면, C 제품은 전체 길이의 약 9% 만이 손상을 입었다. 90° 경사에서의 실험 결과와 마찬가지로 포장재질과 상관없이 제품 C보다 제품 B가 더 많이 손상을 입었다. 제품 C 지포장품을 제외하고

70° 경사에서의 손상된 비율이 90° 경사에서보다 약 11~23(%) 정도 감소하였다. 표 7에 70°에서 낙하된 시료들의 손상된 비율과 정상비율을 나타내었고, 그림 4에 70° 경사의 낙하 시험 장치를 나타내었다. ‘ㄱ’ 형관으로 보강된 PVC 파이프의 자체 무게에 의해 70° 경사에서 시험장치가 휘는 것을 방지하기위해 파이프 하단에는 별도의 철제 가이드를 설치했으며, 파이프 중간과 상단에는 스틸 와이어를 연결하여 크레인으로 고정 하였다.

70°에서 낙하충격에 의해 손상된 부분의 BV는 일부 제품의 경우 표면이 10V 대로 나타났으나 대부분 100V 이상으로 측정되었으며, 단면(약 내부)의 경우도 90°에서 낙하한 시료보다 높게 측정되었다. 따라서 70°에서의 낙하충격이 90°에서의 낙하충격보다 적어서 에멀전이 덜 파괴됨을 알 수 있다. PT의 경우 낙하충격에 의해 손상된 부분은 9mm 미만으로 측정되어 90°에서 낙하한 경우와 별 차이가 없었다. 표 8에 70°에서 낙하된 시료의 BV 및 PT를 나타내었다.

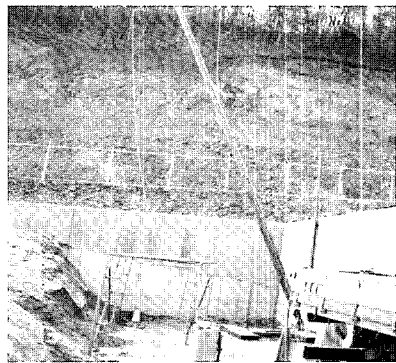


그림 4. 70° 낙하시험 장치.

표 7. 70° 낙하시료의 손상비율과 정상비율

시료구분	손상된 부분		정상 부분	
	5본 평균(cm)	비율(%)	5본 평균(cm)	비율(%)
A(지포장)	8.8	22	32.2	78
B	지포장	10.2	27.8	73
	필름포장	15.4	33	67
C	지포장	8.1	29.9	79
	필름포장	4.2	9	41.8

표 8. 70°, 12m 낙하시료의 비중, BV 및 PT

시료구분		손상된 부분 BV(V)		손상된 부분 PT(mm)
		표면	단면	
A(지포장)		10~303	8~369	5.6
B	지포장	71~545	438~539	4.8
	필름포장	4~469	400~544	3.3
C	지포장	103~463	382~500	7.0
	필름포장	17~660	449~714	8.6

3. 결론

분자화약이 아닌 혼합화약의 경우 강한 외부 충격을 받으면 산화제와 환원제의 인접성이 변하여 감도가 변하고, 비이상 폭굉이 발생하기 쉽다. 특히 에멀전과 같이 물리적으로 불안정한 계에서는 외부 충격에 의해 불연속상을 이루고 있는 산화제 수용액이 결정으로 석출되고, 예감제의 일부가 파괴되는 등 물리적인 변화가 수반된다. 본 연구에서는 12m 높이의 수직공 및 70° 공을 가정하여 에멀전 폭약 5종을 자유낙하시켜 충격을 가한 후 각종 성능을 평가하였으며, 다음과 같은 결론을 얻었다.

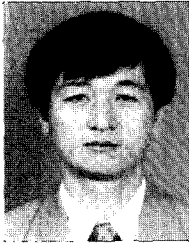
1) 12m 높이, 수직공에서 자유낙하에 의한 충격을 받은 EMX 전 제품은 폭속이 다소 낮아졌으나 8호 너관으로 정상 기폭 되었다. 또한 낙하충격 시험 전 EMX 제품의 이상도는 97~101(%)로 거의 이상적으로 폭굉이 되었으며, 낙하에 의한 충격을 받은 부분의 이상도는 86~99(%)로 시험 전 정상시료의 이상도보다 약 2~13(%) 정도 감소하였고 폭굉 에너지는 4~26(%) 정도 감소하지만 전체 화약공에서 손상된 부분의 비율이 매우 낮으므로 전체적인 발파효율에 미치는 영향은 3% 내외로 매우 미미하였다.

2) 같은 제품군에서 지포장 제품보다 필름포장 제품이 낙하충격에 의해 손상을 더 많이 입었으며 약상이 딱딱한 제품보다 약상이 소프트한 제품이 낙하충격에 의해 손상을 더 많이 입었다.

3) 12m 높이, 70° 경사공에서 자유낙하에 의한 충격을 받은 EMX의 손상된 비율은 90° 경사에서 보다 약 11~23(%) 정도 감소하였다.

참고문헌

1. ㈜한화, 2006, EMX 충격감도 시험결과 보고서, pp. 1-5.
2. Harries, G., 1977, Theory of Blasting, Drilling and Blasting Technology, Australian Mineral Foundation, pp. 3-4.
3. Lownds, C.M., 1992, The Relevance of the Detonation Velocity of Explosives in Blasting, 2nd Bulk Mining Explosives South Africa Surface Mining Seminar, Oct. pp. 9-19.
4. Udy, L.L., 1995, Application of Dense Prills in Explosives, MSI Technical Books 5C No.6, pp. 3-4.

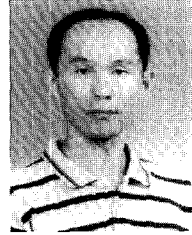


이영호

(주) 한화 보은공장

전화 : 043)540-0300

E-mail : youngho@hanwha.co.kr



이용소

(주)한화 보은공장

전화 : 043)540-0312

E-mail : osgnue@hanwha.co.kr



이승찬

(주) 한화 보은공장

전화 : 043)540-0311

E-mail : i8708405@hanwha.co.kr
