

수직 장공 장약시의 낙하충격에 따른 EMX Performance 영향 연구

이승찬¹⁾ · 이용소¹⁾

1. 서 론

노천 벤치(Bench) 발파의 경우 대규모 장비의 활용을 위한 작업 공간 확보가 용이하므로 발파효율을 극대화 하기위해 장공발파를 실시한다. 수직 장공에 에멀전폭약(이후 약칭 EMX)를 장약하면 낙하충격에 의해 날분이 파손되며, 에멀전 및 예감제 일부가 파괴된다. 에멀전은 산화제 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 -81.10 Kcal/mole 이지만, 결정으로 석출되면 -87.27 Kcal/mole이 되어 폭약의 에너지가 약 7% 정도 감소된다. 산화제의 석출은 산화제와 연료성분의 인접성을 떨어뜨려 산화반응속도가 느려지며 이는 EMX의 기폭감도와 폭속의 저하로 나타난다.

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 해리의 식(Harries Equation)으로 계산되며 폭약의 에너지와 비중의 함수이다.

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

이때 D = Detonation Velocity(m/s)

Q = Heat of Reaction(J/Kg)

ρ = Specific gravity(g/cc)

k = Constant(about 1.15)

에멀전과 예감제가 부분적으로 파괴되면 비이상 폭굉(Non-Idea Detonation)이 진행되어, 충격 에너지(Shock Energy) 및 유효 에너지(Available Energy)가 감소한다. 수직 장공에서 장약 시 낙하충격에 의해 EMX의 폭속이 변한 경우 이를 계산된 이상 폭속으로 나누면 이

1) (주)한화

상도(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 90도 및 70도 각도에서 5종의 EMX를 낙하하여 충격을 준 후 각종 성능시험을 실시하였으며, 낙하충격을 받은 EMX의 이상도(degree of ideality)를 계산하였다.

2. 시료 및 시험방법

2.1 시료의 종류 및 성능

시험에 사용한 시료는 ㈜한화에서 생산되는 약경 50mm 제품 5종이며, 각각의 성능을 표 1에 나타내었다. 35mm 강관 내에 장전 조건(Confined 조건)에서 각 시료의 폭속은 5500~6100m/sec로 이상폭속(Ideal Velocity)에 근접한 값을 나타내었다.

파괴전압(Broken Voltage, 약칭 BV)는 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 파괴전압 값이 서로 다르지만 일반적으로 정상적인 에멀전의 파괴전압은 200V 이상이다.

침입도(Penetration, 약칭 PT)는 원뿔 모양의 추를 일정 높이에서 EMX에 떨어뜨려 약 속으로 추가 들어간 깊이를 측정한 값이다. 약상이 무르면 PT값이 크고 단단할수록 값이 낮아진다.

표 1. 시료의 종류 및 낙하충격 전 성능

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

2.2 시험방법

직경 3인치 길이 12m의 PVC 파이프를 준비하고, 수직으로 세웠을 때 PVC 파이프가 휘지 않도록 'ㄱ'형광으로 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 90도로 고정한다. 낙하산 줄에 시료를 묶어 시료 설치/채취용 구멍에 넣은 후 방폭벽 뒤에서 낙하산 줄을 잡아당겨 파이프 상부로 시료를 끌어 올린다. 시험장 주변에 다른 사람의 접근을 차단하고 낙하산 줄을 놓아 시료를 자유낙하 시킨다. 시료 설치/채취용 구멍에서 낙하된 시료를 꺼내고, 두 번째 시료를 설치하여 동일한 방법으로 시험을 실시한다. 90도에서 낙하시험이 종료된 후 PVC 파이프를 70도로 눕혀 고정하고, 동일한 방법으로 각 시료별 낙하시험을 실시한다. 그림 1.에 수직낙하(90도) 시험 장치를 나타내었다.

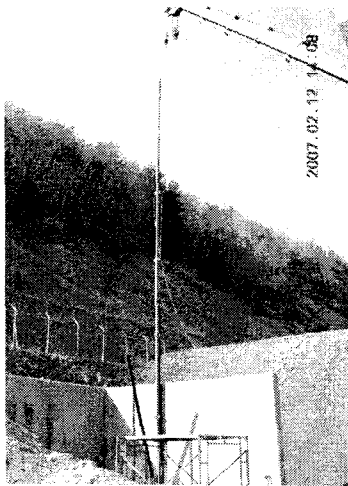


그림 1. 90도 낙하시험 장치

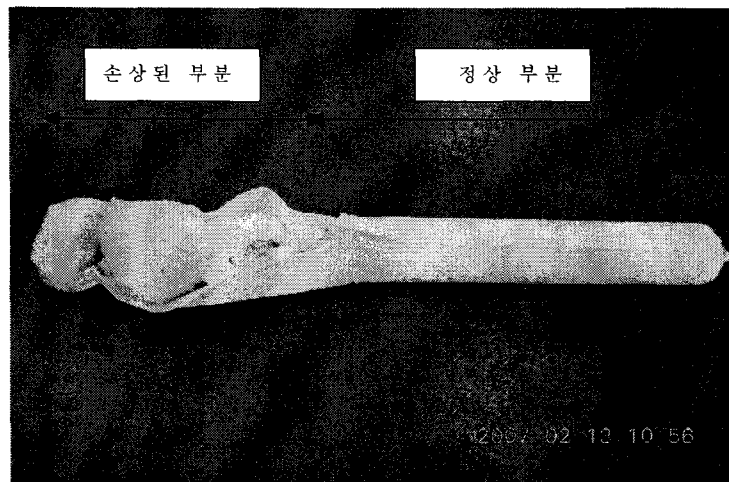


그림 2. 낙하충격에 의해 손상을 입은 날본

2.3 90도 경사에서 낙하한 시료의 성능

필름포장 B 제품은 전체 길이의 약 45%가 낙하 충격에 의해 손상을 입은 반면, 지포장 C 제품은 전체 길이의 약 18%만이 손상을 입었다. 전반적으로 필름포장 제품이 지포장 제품보다 더 많이 손상을 입었으며, C 제품보다 B 제품이 더 많이 손상을 입었다.

이는 C 제품이 B 제품 보다 약상이 더 딱딱하여 낙하 시 하부 일부만 충격을 받았기 때문인 것으로 보인다. 지포장 A는 C제품보다 딱딱하지만 낙하에 의한 충격을 더 많이 받았는데, 이는 포장지의 재질차이 때문으로 추정된다. 그림 2.에 낙하 충격에 의해 손상을 입은 날본의 사진을 나타내었으며, 표 2. 에 90도에서 낙하된 시료들의 손상된 비율과 정상비율을 나타내었다.

표 2. 90도에서 낙하한 시료의 손상된 비율과 정상비율 비교

시료구분	손상된 부분		정상 부분	
	5분 평균(cm)	비율(%)	5분 평균(cm)	비율(%)
지포장 A	16	39	25	61
지포장 B	14.6	38	23.4	62
지포장 C	7	18	31	82
필름포장 B	21.2	45	25.8	55
필름포장 C	14.6	31	31.4	68

강관 장전(Confined) 조건에서 낙하충격 전 각 시료의 이상도(Degree of Ideality)는 97 ~ 101%로 거의 이상적으로 폭평이 되었다. 90도에서 낙하하여 손상된 부분은 폭속이 다소 낮아졌으나 모두 8호 뇌관으로 정상기폭 되었다. 따라서 잔류약의 발생 원인은 낙하충격에 의한 것이라기보다는 절리나 암반 내 지하수의 연결에 의한 사압 발생, 공내 화약칼럼 중간에 암분의 침투 또는 비 적절한 기폭방법 등의 이유 때문인 것으로 추정된다.

강관 장전(Confined) 조건에서 손상된 부분의 폭속은 시험 전 폭속 대비 87 ~ 98% 수준이었으며, 날본(Unconfined) 조건에서는 70 ~ 97% 수준이었다. 손상된 부분의 이상도는 86 ~ 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 90도 각도의 12m 높이에서 낙하하여 충격을 받은 EMX는 8호 뇌관에 의해 기폭되는 감도를 유지하지만, 이상폭평(Ideal Detonation)에서 벗어나 폭속이 낮아지고 유효 에너지(Available Energy)가 다소 감소됨을 알 수 있다. 표 3.에 90도에서 낙하된 시료의 폭속을 나타내었으며, 표 4.에 이상도를 나타내었다.

표 3. 90도, 12m 높이에서 낙하된 시료의 폭속

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

표 4. 90도, 12m 높이에서 낙하된 시료의 이상도(Degree of Ideality) 기준 : 강관 장전 폭속

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

90도에서 낙하충격을 받아 손상된 부분은 비중이 0.05~0.20 g/cc 정도 증가 하였으며, 낙하 후 정상부분은 비중 변화가 없었다. 따라서 낙하충격에 의해 예감제가 파손되는 비율은 매우 낮았으며, 한계 비중(Critical Density) 이상으로 비중이 증가하지 않으므로 8호 뇌관에 의한 기폭감도를 유지 하였다. 90도, 12m 높이에서 낙하된 시료의 폭속이 감소하고, 이상도가 줄어드는 이유는 주로 예멀전의 부분적인 파괴(산화제 수용액의 결정화)에 의한 비이상 폭굉(Non-Ideal Detonation) 때문인 것으로 판단된다. 낙하충격에 의해 손상된 부분의 파괴 전압은 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 5.에 90도에서 낙하된 시료의 비중, 파괴전압 및 침입도를 나타내었다.

표 5. 90도, 12m 높이에서 낙하된 시료의 비중, 파괴전압 및 침입도

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

2.4 폭굉 에너지(Detonation Energy) 및 비중 변화와 폭속 변화의 관계

Lownds 등에 의하면 폭굉 에너지(Detonation Energy)가 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 90도, 12m 높이에서 낙하되어 손상된 시료의 폭굉 에너지 감소율을 계산해 보면 다음과 같다. 필름포장 B와 필름포장 C는 폭속이 2% 정도 감소했으므로 폭굉 에너지가 4% 감소되었다. 뉴마이트 플러스 I 지포장은 폭속이 3% 감소했으므로 폭굉 에너지가 6% 정도 감소되었다. 지포장 A는 폭속이 8% 감소했으므로 폭굉 에너지가 16% 정도 감소되었으며, 지포장 C는 폭속이 13% 감소했으므로 폭굉 에너지가 26% 정도 감소되었다. 지포장 C의 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 시료별로 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 6.에 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 70도 경사에서 낙하한 시료의 성능

필름포장 B 제품은 전체 길이의 약 33%가 낙하충격에 의해 손상을 입은 반면, 필름포장 C 제품은 전체 길이의 약 9% 만이 손상을 입었다. 90도 경사에서의 실험 결과와 마찬가지로 C 제품 보다 B 제품이 더 많이 손상을 입었다. 지포장 C 제품을 제외하고 70도 경사에서의 손상된 비율이 90도 경사에서보다 약 11 ~ 23% 정도 감소하였다. 표 7.에 70도에서 낙하된 시료들의 손상된 비율과 정상비율을 나타내었고, 그림 3.에 70도 경사의 낙하 시험장치를 나타내었다. 'ㄱ' 형광으로 보강된 PVC 파이프의 자체무게에 의해 70도 경사에서 시험장치가 휘는 것을 방지하기위해 파이프 하단에는 별도의 철제 가이드를 설치했으며, 파이프 중간과 상단에는 스틸 와이어를 연결하여 크레인으로 고정 하였다.

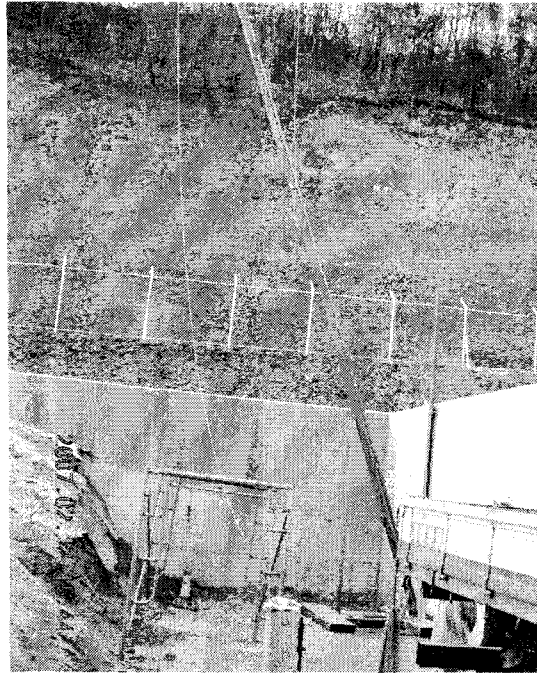


그림 3. 70도 낙하시험 장치

표 7. 70도에서 낙하된 시료의 손상된 비율과 정상비율 비교

시료구분	손상된 부분		정상 부분	
	5분 평균(cm)	비율(%)	5분 평균(cm)	비율(%)
지포장 A	8.8	22	32.2	78
지포장 B	10.2	27	27.8	73
지포장 C	8.1	21	29.9	79
필름포장 B	15.4	33	31.6	67
필름포장 C	4.2	9	41.8	91

70도에서 낙하충격에 의해 손상된 부분의 파괴전압은 일부 제품의 경우 표면이 10 V 대로 나타났으나 대부분 100 V 이상으로 측정되었으며, 단면의 경우도 90도에서 낙하한 시료보다 높게 측정되었다. 따라서 70도에서의 낙하충격이 90도에서의 낙하충격보다 적어서 에멀전이 덜 파괴됨을 알 수 있다. 침입도의 경우 낙하충격에 의해 손상된 부분은 9 mm 미만으로 측정되어 90도에서 낙하한 경우와 별 차이가 없었다. 표 8.에 70도에서 낙하된 시료의 파괴전압 및 침입도를 나타내었다.

표 8. 70도, 12m 높이에서 낙하된 시료의 비중, 파괴전압 및 침입도

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

3. 결론

분자화약이 아닌 혼합화약의 경우 강한 외부 충격을 받으면 산화제와 환원제의 인접성이 변하여 감도가 변하고, 비이상 폭굉(Non-Ideal Detonation)이 발생하기 쉽다. 특히 에멀전(Emulsion)과 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 70도 공을 가정하여 (주)한화에서 생산된 에멀전 폭약 5종을 자유낙하 시켜 충격을 가한 후 각종 성능을 평가 하였으며, 다음과 같은 결론을 얻었다.

1) 12m 높이, 수직공에서 자유낙하에 의한 충격을 받은 EMX 전 제품은 8호 뇌관에 의해 정상 기폭 되었다.

2) 지포장 제품보다 필름포장 제품이 낙하충격에 의해 손상을 더 많이 입었다.

3) 약상이 딱딱한 제품보다 약상이 소프트한 제품이 낙하충격에 의해 손상을 더 많이 입었다.

4) 낙하충격 시험 전 EMX 제품의 이상도(Degree of Ideality)는 97 ~ 101%로 거의 이상적으로 폭굉이 되었으며, 12m 높이 수직공에서 자유낙하에 의한 충격을 받은 부분의 이상도는 86 ~ 99%로 시험 전 정상시료의 이상도보다 약 2 ~ 13% 정도 감소하였다.

5) 12m 높이, 수직공에서 낙하충격을 받아 손상된 EMX는 정상적인 제품에 비해 폭굉 에너지(Detonation energy)가 4 ~ 26% 정도 감소하지만 전체 화약공에서 손상된 부분의 비율이 매우 낮으므로 전체적인 발파효율에 미치는 영향은 3% 내외로 매우 미미하다.

6) 12m 높이, 70도 경사공에서 자유낙하에 의한 충격을 받은 EMX의 손상된 비율은 90도 경사에서보다 약 11 ~ 23% 정도 감소하였다.

참고문헌

1. Harries G., 1997, Theory of Blasting, Drilling and Blasting Technology, Australian Mineral Foundation.
2. C. Mick. Lownds, 1992, The Relevance of the Detonation Velocity of Explosives in Blasting, 2nd Bulk Mining Explosives South Africa Surface Mining Seminar, Oct.
3. MSI Technical Book 5C, 1985, Design and Development Information, Reference Book and Documents.
4. ㈜한화, 2006, 기술자료, Primer Requirements 검토 보고서.
5. ㈜한화, 2007, 기술자료, EMX 수직 장공 장약시의 낙하충격에 따른 Performance 영향 평가계획.
6. ㈜한화, 2007, 기술자료, EMX 수직 장공 장약시의 낙하충격에 따른 Performance 영향 평가결과.
7. ㈜한화, 2006, 기술자료, EMX 충격감도 시험결과 보고서.
8. Persson, P-A, R. Holmberg and J. Lee, 1994, Rock Blasting and Explosives Engineering, CTC Press.