

## 에멀전폭약의 최소연소압력에 관한 연구

이승찬, 교재순, 이영호<sup>1)</sup>

### Minimum Burning Pressure of Emulsion Explosives

Seung-Chan Lee, Jae-Soon Khau and Young-Ho Lee

**ABSTRACT.** It is well accepted that modern emulsion explosives are intrinsically much less sensitive than traditional products such as dynamites or black powder. However, they have still been involved in a significant number of accidental explosions. In October 1975, Canadian Research, Limited's, Energetic Research Laboratory in Quebec exploded. Although explanations for the incident varied, one logical explanation was that the pump used in transporting the emulsion dead headed, thereby turning mechanical work in to frictional heating under a zero flow rate. There is a minimum pressure required for combustion(MBP) to propagate in emulsion explosives. A stable deflagration may lead to a deflagration-to-detonation transition(DDT) in emulsion explosives. Tests were also performed on sensitized sampled consisting of 6 to 21% waters as well as 1 to 11% aluminium powder. It was founded the emulsion explosives consisting of 6% waters had the lowest minimum burning pressure(MBP) of 3 bar, and the 21% waters were unable to achieve sustained burning at pressures as high as 100 bar. The aluminium contained explosives tested here displayed a MBP higher than that of without emulsion. It appears that this test may offer a firm ground for the classification of emulsion explosives in view of the regulating the hazards associated with the various process used for their manufacturing and transport.

**Key words** : emulsion explosives, combustion, detonation, MBP

**초 목.** 일반적으로 유중수형 에멀전폭약은 제조공정이나 사용조건에서 안전하다고 알려져 있다. 그러나 1975년 캐나다에서 벌크 에멀전폭약을 펌프로 이송 중에 발생한 폭발사고와 같이 원치 않는 사고가 발생할 가능성이 있다. 에멀전폭약은 어떠한 조건하에서 착화하는 경우 연소에서 폭펡으로 전이(Deflagration-to-Detonation Transition, 약칭 DDT)하는 현상이 발생하며 또한 연소가 온도에 따라 지속되는 최소 압력(Minimum Burning Pressure, 약칭 MBP)이 존재하며 최소 압력이하로 유지할 경우 착화되어도 바로 연소가 중단되는 것으로 알려져 있다. 본 연구는 에멀전폭약 제조공정의 안전성 평가를 목적으로 다양한 에멀전폭약을 제조, 밀폐용기 내에서 최소연소압력(MBP) 측정 시험을 실시하였다. 본 실험에서 수분함량 6%에서 20%, 알루미늄 함량 1%에서 11%까지 함유한 시료를 각각 제조하여 밀폐용기 내에서 열원의 온도별로 실시하였다. 실험결과 수분함량 6% 시료의 최소연소압력(MBP)이 가장 낮은 3 bar를 나타냈으며 수분함량 18%이상에서는 100bar이상에서도 연소가 지속되지 않았다. 알루미늄 함량에 따라서는 큰 변화는 보이지 않았으나 알루미늄을 함유하지 않는 것에 비해 최소연소압력(MBP)가 비교적 높게 나타났다. 따라서 향후 에멀전폭약 제조공정의 안전성 향상을 위하여 제조하는 에멀전폭약의 최소연소압력(MBP)를 측정, 공정압력조건을 MBP 이하로 관리할 때 안전을 보증할 수 있을 것으로 판단된다.

**핵심어** : 유중수형 에멀전폭약, 연소, 폭펡, 최소연소압력(MBP), 안전성

### 1. 서 론

에멀전폭약은 다이ना마이트나 흑색화약과 같은 기존 산업용폭약에 비해 둔감한 것으로 알려져 있다. 또한 에멀전폭약은 유동성이 좋아 제조공정에

서 보통 펌프를 사용하여 벌크(Bulk) 상태로 이송시키고 제조공실에서의 취급량(혹은 정제량)도 대규모이다. 하지만 제조공정 중 사고가 발생할 경우 대형폭발 사고 우려가 있어 최근 안전성 평가의 일환으로 에멀전폭약의 연소 특성에 관한 연구가 많이 진행되고 있다.

에멀전폭약의 비정상적인 점화는 열에 의한 것

1) (주) 한화

접수일 : 2004년 9월 13일

으로 두가지 경우를 가정할 수 있다. 첫번째는 대규모의 폭약이 저장되어 있는 화약고에 화재가 발생하여 한계온도까지 폭약의 온도가 상승되면 폭약은 분해한다. 이런 반응을 열폭발(Thermal Explosion or Cook-Off)이라고 하며 이 반응은 상당히 빠르게 폭약의 양에 따라 주변의 폭약을 기폭시킬 수 있는 충격파를 동반하기도 한다. 이런 반응은 폭약 이송 펌프의 공운전(dry-running)이나 데드 헤드(dead head)에 기인한 과열(overheating)으로도 발생할 수 있다.(4) 또한 이런 반응은 운송 중 발생할 수 있는 트럭의 화재-경유나 타이어 연소와같은 차량 화재-에 의해 발생 될 수도 있다.

두번째의 경우는 기계 혹은 열에너지가 에멀전 폭약의 일부분에 축적될 때이다. 부분적인 고온 지역을 핫스포트(Hot spot)로 부른다. 이 핫스포트(Hot spot)에 의해 전달 된 열전달량(Heat flux)과 크기에 의해 핫스포트(Hot spot)/폭약 계면에서 연소반응이 시작된다. 압력과 밀폐(Confinement)조건에 따라 폭연, 폭굉으로 발전한다. 이러한 부분적인 핫스포트(Hot spot)는 갑작스런 열원에 접촉될 경우에도 일어난다. 다른 메커니즘으로 이러한 종류의 폭약에 포함된 증공구체(Voids)의 급격한 압축은 치명적인 부분적인 점화를 일으킬 수 있다.

많은 열적 폭발 위험에 대하여 조사한 결과 에멀전폭약은 대기압 하에서 부분적인 점화는 반응을 진행하지 않는 것으로 나타났다. 이것은 연소 초기 단계가 흡열(Endothermic)이기 때문이다. 결론적으로 모든 함수폭약은 연소가 발생하기 위해 요구되는 최저압력이 존재한다. 이것을 폭약의 최소연소압력(MBP)이라 한다. 이 압력이하에서는 폭약은 강력한 핫스포트(Hot spot)으로 점화할지라도 절대 연소가 지속되지 않는다. 그러나 최소연소압력(MBP)이상에서는 폭약은 정상적으로 연소를 지속한다.

## 2. 이론적인 검토

최소연소압력(MBP)은 반응영역에서의 열전달량 뿐만 아니라 폭약조성의 물 함량에 영향을 받는다.

즉 폭약이 보유한 물의 증발 및 질산암모늄(Ammonium Nitrate, 약칭 AN)의 해리(Dissociation)가 흡열반응이므로 연소 초기 단계에서 대기압에서는 연소가 계속 진행되지 않는다. 압력이 높아져도 여전히 흡열반응이지만 반응영역(연소영역)은 발열(exothermic)이므로 자기연소대(Self-propagating front)가 형성될 수 있다. 엔지니어링 측면에서 최소연소압력(MBP)은 기본적으로 열전도와 관련된 현상이다. 에멀전 표면에서 물이 증발하고 질산암모늄(AN)이 해리함과 동시에 열확산영역(Heat Diffusion Zone)을 통하여 열전달이 발생하고 열전도에 의해 주변 물질들을 가열한다. 이것이 한번 발생하면 물질(mass)은 연소면을 통하여 연소영역으로 연료와 산화제(산소)를 제공하면서 이동한다. 즉 열은 우측으로 물질(mass)은 좌측으로 이동한다. 열은 뜨거운 곳으로부터 차가운 곳으로 전도되며 연소면에서의 열은 시료의 중심부로 전도된다. 이것이 연소반응에서의 열전도 기본이다. 그림1은 연소를 개략적으로 그림으로 표시한 것이다.

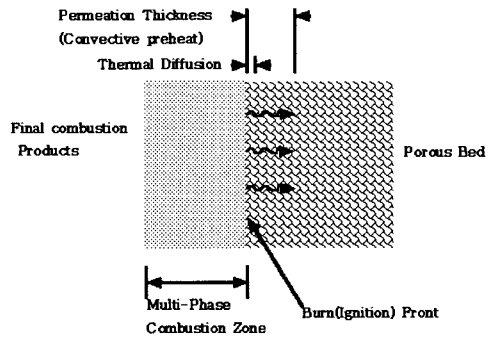


그림1 연소의 물리 및 열전달 개략도

최소연소압력(MBP)은 열전도도 측면에서 보면 연소영역의 두께를 줄이고 늘리는 것이다. 압력이 높아지면 연소영역은 압축되고 열분산영역과 근접하게 된다. 이러한 조건에서 열원은 반응물질과 더 가까워지고 연소는 유지된다. 그러나 압력이 낮아지면 연소면과 연소영역은 팽창하고 반응물질로부터 떨어지게 된다. 이것은 열과 물질(mass)분산율

통해 부피를 증가, 열전달량을 감소시킬 뿐만 아니라 물질과 화염(Flame)면과의 근접도도 떨어져 추진력이 없어진다. 예를 들면 성냥을 가지고 초에 불을 붙일 때 심지를 세운 다음 약간 떨어져서 초에 불을 붙이는 것과 같다.

만약 초가 아니라 휘발유에 불을 붙일 경우에는 휘발유는 초보다 반응열이 높기 때문에 점화를 위해 초보다는 성냥을 잡은 거리를 조금 더 떨어져야 한다. 한편으로 휘발유는 높은 열전도도를 가지고 있으므로 열전달량은 빠르다.

결과적으로 연소를 유지하기 위하여 화염(Flame)면을 근접할 필요가 없으므로 가솔린의 최소연소압력(MBP)는 초보다 낮을 것이다.

또한 최소연소압력(MBP)은 미소중공구체(Microsphere), 화학적 예감제(Chemical Sensitizer)에 의해 영향을 받는다. 모노메틸아민나이트레이트(Monomethylamineniratte), 헥사민나이트레이트(Hexaminenitrate), 알루미늄 등이 화학적 예감제(Chemical sensitizer)로 사용된다. 또한 에멀전폭약의 노화 정도, 결정화 발생도, 에멀전의 입자크기도 에멀전폭약의 최소연소압력(MBP)에 크게 영향을 미친다.

본 실험에서는 물 함량(Water content) 및 알루미늄(Al) 함량별로 최소연소압력(MBP)을 측정해보고 그 결과를 이론적인 검토 결과와 비교해보았다.

### 3. 실험 방법

#### 3.1 시료

본 실험에 사용한 시료는 표1과 표2에 나타내었다. 표1은 물 함량별로 제조한 보통의 에멀전폭약이다. 산화제 및 연료, 유화제 함량은 동일하게 하고 물함량을 6%, 9%, 12%, 15%, 20%로 변경시켜 시료를 제조하였다. 이때 유리미소중공구체(Glass Microballoon)를 적당량 혼합하여 전 시료의 Bulk density를 1.16으로 조정하였다. 표2는 물함량 12% 에멀전에 유리미소중공구체(GMB) 3.5%, 알루미늄(Al)함량을 1%, 3%, 5%, 7%, 9%로 변경시켜 시료를 제조하였다.

표 1. 물 함량별 조성표

원료	시료 A	시료 B	시료 C	시료 D	시료 E	시료 F
산화제/연료/ 유화제/ 유리미소중공구체	94%	91%	88%	85%	82%	79%
물	6%	9%	12%	15%	18%	21%

표 2. 알루미늄 함량별 조성표

원료	시료 G	시료 H	시료 I	시료 J	시료 K	시료 L
시료 C	99%	87%	95%	93%	91%	89%
알루미늄	1%	3%	5%	7%	9%	11%

#### 3.2 시험장치

본 실험에 사용한 장치는 그림2와 그림3에 나타내었다. 용기는 직경 100mm, 높이 200mm이고 용적은 1571cc인 고압용기이다.

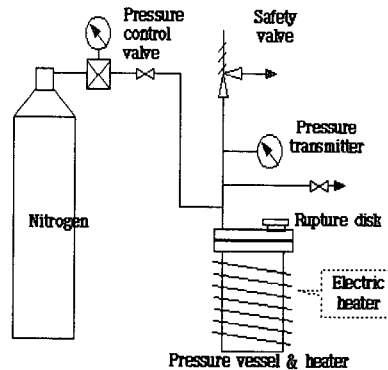


그림 2. 최소연소압력(MBP) 측정장치도

용기는 연결된 고압질소용기로부터 질소를 공급하여 용기 초기압력을 임의대로 변경하여 시험이 가능하도록 제작되었다. 또한 장치 중앙부에 설치한 시료는 전기히터를 사용하여 전류 조정 장치에서 전류를 0에서 10A까지 조정하여 공급, 점화하도록 설치되었다. 용기내의 압력 및 온도는 열전대(Thermocouple), 트랜스미터(transmitter), 변환기(convertor)를 통해 전달된 데이터가 기록계에 의해

자동 기록하도록 되어 있으며 시료의 온도를 제조 공정 조건과 동일하게 하도록 용기의 외부에 전기히터를 부착하여 시료온도의 조절이 가능하도록 하였다. 또한 용기의 압력은 10bar(혹은 20bar)로 설정된 안전밸브(Safety Valve)와 60bar(혹은 100bar)로 설정된 파열판(Rupture Disk)을 부착하여 과도한 압력이 걸리지 않도록 하였다.

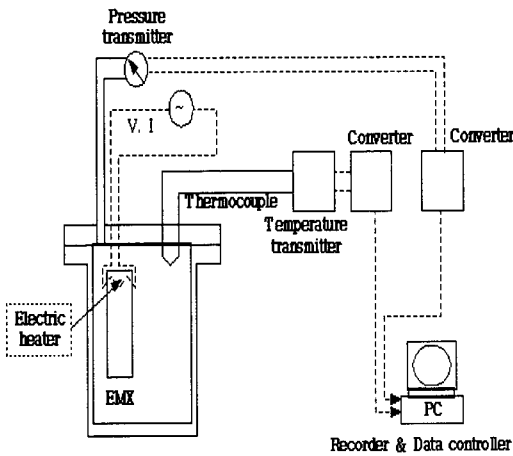


그림 3 최소연소압력(MBP) 측정 시스템

3.3 시험방법

시료는 먼저 크라프트지로 싸서  $\phi 25\text{mm} \times 100\text{g}$ 으로 만든 후 용기내부 히터에 삽입한 후 조립하고 외부히터에 전원을 공급하여 시료의 온도가 90℃로 히팅되도록 3시간동안 가열하였다. 이후 질소가스를 주입하여 초기압력을 조정한 후 시료 히팅센서에 전원을 가하여 점화를 시켰다. 가열시간은 최고 5분까지 실시하였으며 점화온도는 최소연소압력(MBP)이 발생하는 최저온도를 측정하여 230℃부터 실시하였다.

최소연소압력(MBP)인지 판단은 전원을 가하여 온도와 압력 그래프로 계속적으로 상승할 때와 시험 종료 후 약의 잔류여부로 최소연소압력(MBP)을 판단하였다.(그림.4, 5, 6, 7 참조)

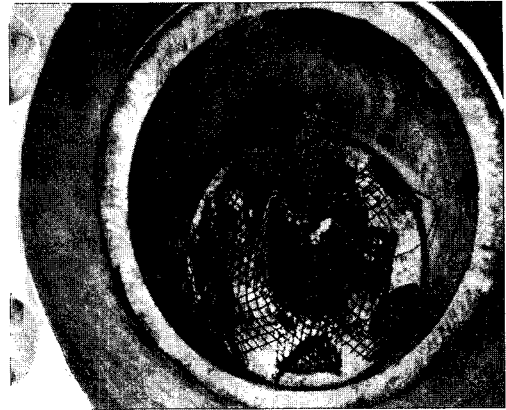


그림 4. 완전 연소된 시료 사진

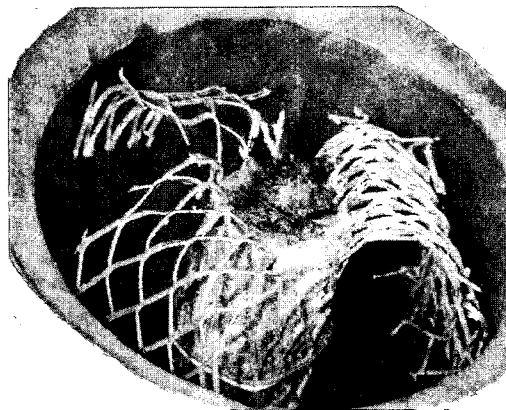


그림 5. 연소 중단된 시료

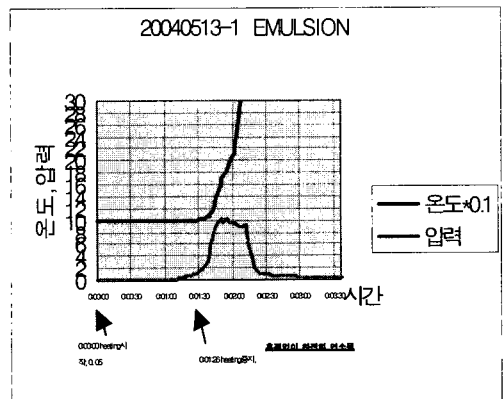


그림 6. 대기압에서 연소가 된 시료

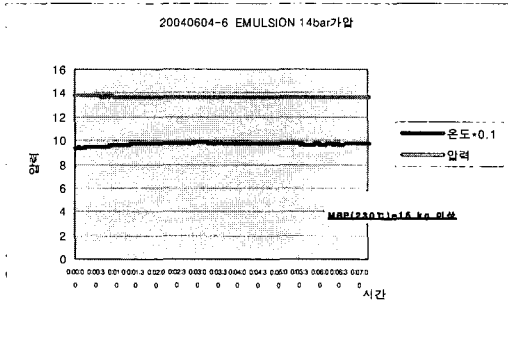


그림 7. 14bar에서 연소되지 않은 시료

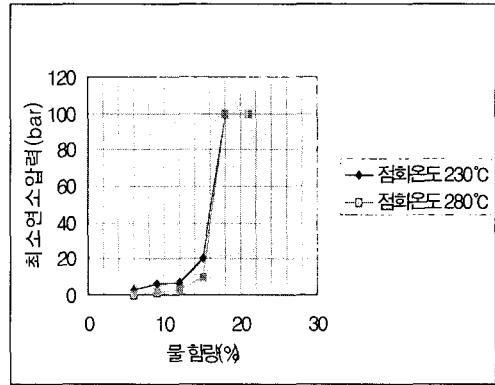


그림 8. 물 함량 대 최소연소압력

#### 4. 실험 결과

##### 4.1 물 함량이 최소연소압력(MBP)에 미치는 영향

물 함량에 따른 최소연소압력(MBP) 측정 결과는 표 3 및 그림 8에 표시하였다. 최소연소압력(MBP)은 물 함량이 증가함에 따라 점차적으로 증가하는 것으로 나타났다. 부스터 기폭성의 에멀전폭약 기준인 물함량 18%이상인 경우에는 100bar이상에서도 최소연소압력(MBP)을 얻을 수 없었다. 또한 뇌관기폭성 에멀전폭약인 수함량 15%이하인 경우에는 보통 펌프 운전압력인 20bar이하로 나타났다.

따라서 에멀전폭약 조성에 따라 최소연소압력(MBP) 측정 시험을 실시하여 제조공정조건을 최소연소압력(MBP)이하로 관리하여야 제조 안전을 보증할 수 있을 것으로 보인다.

표 3. 물 함량에 따른 최소연소압력

시료명	물 함량 (%)	최소연소압력(MBP), bar at 점화 온도(°C)	
		230	280
A	6	3.0	대기압(밀폐)
B	9	6.0	1.5
C	12	7.0	3.0
D	15	20.0	10.0
E	18	연소 중단(100 bar)	
F	21	연소 중단(100 bar)	

##### 4.2 알루미늄 영향

에멀전에 알루미늄 함량을 변화시켜 최소연소압력(MBP) 측정을 실시하였다. 결과를 표 4 및 그림 9에 정리하였는데 알루미늄 함량 5%일 때 최고치를 나타내었으나 알루미늄 함량은 크게 최소연소압력(MBP)에 영향을 미치지 않는 것으로 나타났다. 알루미늄이 첨가된 시료는 대체적으로 첨가하지 않은 시료보다 최소연소압력(MBP)이 높은 것으로 나타났는데 알루미늄을 첨가할 경우 시료의 열전도도가 좋아지므로 점화에너지를 가하면 열이 빠르게 비산(전도)되므로 착화하기 어려운 것으로 보여진다.

표 4. 알루미늄 함량에 따른 최소연소압력

시료명	알루미늄 함량 (%)	최소연소압력(MBP), bar at 점화 온도(°C)	
		230	280
G	1	6.0	3.0
H	3	7.0	5.0
I	5	7.0	6.0
J	7	7.0	5.0
K	9	7.0	4.0
L	11	7.0	3.0

그러나 점화온도가 350°C 이상인 경우 최소연소압력(MBP)은 타시료와 동일하게 낮아지고 일단 점화가 되면 연소가 폭발적으로 일어나고 실험 완료

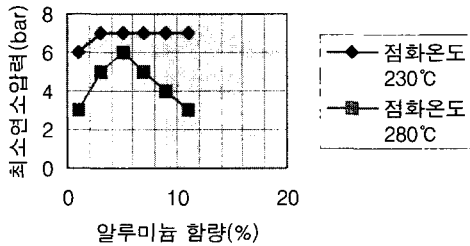


그림 9. 알루미늄 함량 대 최소연소압력

후 장치를 분해하여 시료를 확인해보면 약 잔유물이 존재하지 않으므로 폭굉으로의 전이(DDT) 가능성이 있는 것으로 나타났다.

또한 시료를 강제로 에멀전을 파괴시켜 최소연소압력(MBP)을 측정한 결과 대기압하에서 점화할 경우 연소가 지속되는 것으로 나타났다. 따라서 제조공정 중 파괴된 에멀전폭약을 취급할 경우에는 일단 점화되면 연소가 지속되므로 점화원 관리를 철저히 하여야 한다.

## 5. 결 론

상기의 실험을 통하여 뇌관 기폭성 에멀전폭약의 최소연소압력(MBP)은 0에서 20bar 사이에 위치한 것으로 조사되었으며 이론적인 검토에서 기술한바와 같이 최소연소압력(MBP)에 가장 영향을 미치는 요인은 물함량이며 알루미늄의 함량은 크게 영향을 미치지 않으나 일단 연소된 시료의 연소속도는 상당히 빠른 것으로 나타났다.

따라서 에멀전폭약 제조공장을 설계할 경우에는 먼저 공장에서 발생할 수 있는 공정 온도를 계산, 예측한 후에 이 온도에 해당하는 제조 에멀전폭약의 최소연소압력(MBP)을 실험에 의해 설정 후 이 압력이하로 공장을 운영할 수 있는 안전장치(압력스위치, 파열판등)를 설치하면 에멀전공장의 사고를 방지할 수 있을 것이다.

본 실험에서 측정한 MBP는 완전히 밀폐된 시스

템에서 연소가 지속될 수 있는 최소 압력을 측정한 data이다.

이후 부분적으로 밀폐된 시스템에서 연소가 지속될 수 있는 최소 압력을 측정하여야 할 것으로 보인다.

## 참 고 문 헌

1. 廣崎義一외, 2000, Emulsion爆藥의 燃燒特性(弟1報) 加壓容器試驗, Kayaku Gakkaiishi, Vol. 61, pp. 35-41.
2. Maines, R., 1999, Minimum Burning Pressure on Emulsion Explosives, EMRTC Initial Report.
3. Turcotte, R., 2002, Towards Measuring the Minimum Burning Pressure of Commercial Explosives, CER: Report#2002-21.
4. Perlid, H., 1996, Pump safety Tests Regarding Emulsion Explosives, Proceedings of the 22nd Annual Conference in Explosives and Blasting Technique, pp. 101-111.
5. Braithwaite, M., 1993, Thermal Hazard Testing of Aqueous Emulsion Explosives, International Exchange of Experience on Industry. Connected Accidents of the Explosives Industries, Nice-France, pp. 150-166.