

저폭속 화약 Kinecker의 특성 및 제조원리

이익주, 김희도, 안봉도, 최성현, 임정혁¹⁾

1. 서론

에멀전 폭약은 예감제가 보통 2wt% ~ 7wt%로 혼합되며 매트릭스속에 균질하게 혼합되어 뇌관에서 나오는 불꽃, 충격파등에 의한 반응을 연속적인 열점(hot spots)현상을 일으켜 반응이 중단되지 않고 진행되는 것이다. 그러므로 예감제의 양이 적어도 연속반응을 못하고 중단되는 경우도 생길 수 있으므로 제조시 매우 중요하게 관리해야 하는 제품이다. 이러한미진동 Kinecker에 사용되는 저폭속화약은 에멀전 폭발반응이 중단되지 않는 범위에서 최대한 기폭성과 최소한의 저장안정성을 갖고 에멀전구조를 깨뜨리지 않으면서 반응을 완화하는 첨가제를 매트릭스와 최적의 배합비로 혼합함으로써 만들어진다. 본 연구에서는 기존 에멀전 폭약과 저폭속화약인 Kinecker의 폭발압력, 공내작용압력, 폭속 등의 위력요소들을 실험을 통해 비교분석하여 저폭속화약 Kinecker의 상대적인 위력수준을 알아보하고자 한다.

2. 저폭속화약 Kinecker의 제조

2.1 실험항목 및 방법

에멀전폭약의 폭발반응을 느리게 하는 역할의 불활성 첨가제를 구하기 위하여 여러 가지 재료를 가지고 에멀전의 형성여부, 밀도측정, 기폭여부, 순폭여부, 폭속측정 등의 실험을 실시하여 가장 최적의 물질과 함유량을 구하였다.

가. 부피밀도 실험

중량과 부피를 알고 있는 Sample Cup에 에멀전 폭약을 채워 넣은 후 밀도칼로 수평되게 굽는다. 수평되게 굽은 샘플컵을 저울위에 올려놓고 무게를 읽고 식(1)을 이용하여 계산한 값을 소수점 2자리 까지 나타낸다.

$$Bulk\text{밀도 } (g/cc) = \frac{(Sample + Cup) - Cup}{Sample\text{ Cup 부피}} \quad (1)$$

1) (주)고려노벨화약

이익주, 김희도, 안봉도, 최성현, 임정혁

나. 제품 NET 중량 실험

에멀전폭약 sample을 가지고 저울 위에 올려 무게를 3회 이상 평량하고 평량된 무게를 기록한다.

다. 기폭 및 순폭 실험

에멀전폭약 sample과 뇌관을 준비하여 그림 1과 같이 연결하여 뇌관을 기폭 시켜서 1-1과 1-2의 폭발여부를 살핀다. 1-1은 기폭도, 1-2는 순폭도를 나타낸다.

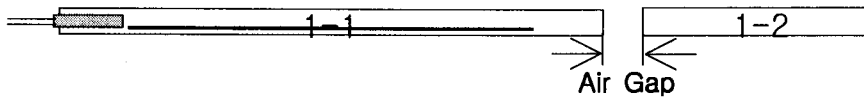


그림 1. 기폭여부와 순폭도 모식도

라. 폭속 실험

국내에서 폭속시험은 KS-M-4802에서 규정하는 방법이 있다. 그러나 본 시험에서는 세계적으로 공인되고 국내화약 제조사에서 사용하고 있는 Instanet사의 VM0122측정기(그림 2를 사용하였다. 이 측정기는 Timer식과 저항식을 두 가지 방식으로 측정할 수 있는 기계이며 본 시험에서는 저항식을 기준으로 시험을 실시하였다.

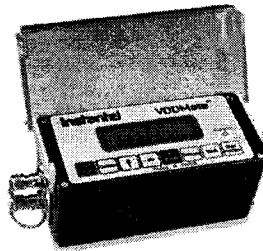


그림 2. VM0122 폭속측정기

(1) Timer 방식

폭속측정기와 에멀전폭약 샘플을 준비하여 그림 10와 같이 폭속측정기의 채널1을 뇌관의 기폭부분이 되게 에멀전 폭약에 일정거리(30cm)를 두고 센서케이블을 단락시켜 설치하고 폭약을 폭발시키면 폭속자료가 자동으로 폭속측정기에 기록된다. 기록된 폭속자료는 컴퓨터로 불러서 그래프의 변화가 시작되는 시점의 시간을 읽어 그 값을 거리에 대하여 나누어 주면 폭속이 계산되어 지며 아래식으로 표시된다.

$$VOD(m/s) = \frac{A지점과 B지점사이의 거리}{A지점의 시간 - B지점의 시간} \quad (2)$$

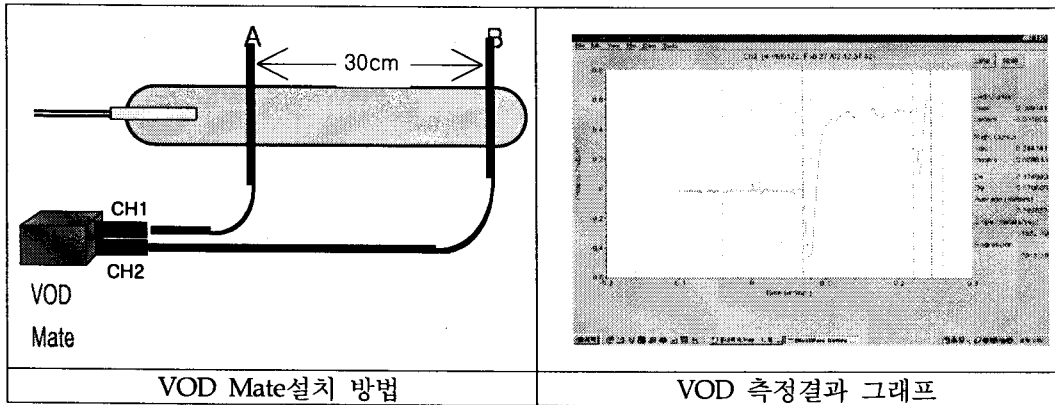


그림 3. Timer 방식 폭속 측정

(2) 저항방식

그림 4와 같이 폭약에 sensing cable을 끝 부분을 단락시킨 후 폭약에서 떨어 지지 않도록 Tape로 묶어 준다. 폭약의 최소 0.4m 이상은 센서케이블과 묶어야 하며 발파로 인해 폭속 측정기가 영향을 받지 않도록 안전한 곳에 설치한 후 발 발파를 실시하면 자동적으로 Data가 저장된다. 측정 종료 후 폭속측정기를 PC에 연결하면 그림 5의 그래프로 나타나며 그래프의 기울기로 VOD를 구한다.

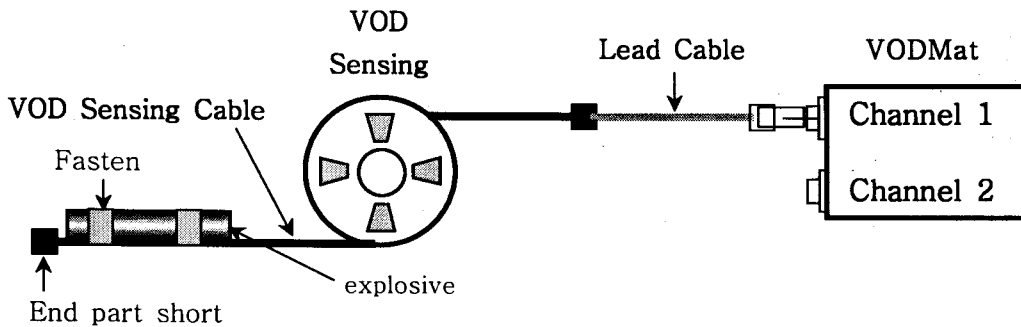


그림 4. 저항방식 폭속 측정 방법

이익주, 김희도, 안봉도, 최성현, 임정혁

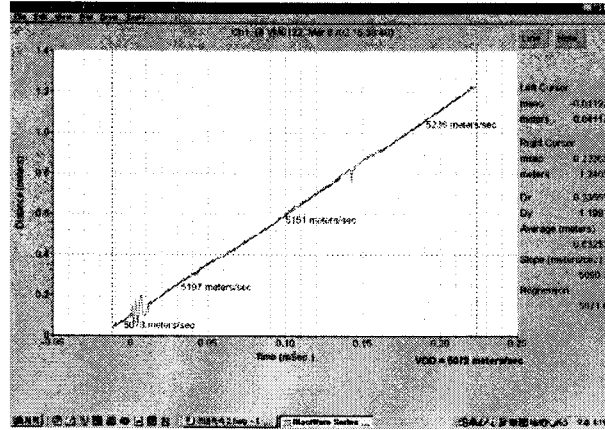


그림 5. 저항 방식에 의한 VOD 측정결과 그래프

2.2. 첨가제의 선정

첨가제는 에너지의 발생정도, 순폭성, 비반응성 물질여부, 밀도로서 부피강도를 낮출 수 있는가, 폭발반응속도 완화정도, 경제성 등을 고려하여 여러 가지 물질(OS, 황성탄, 소석회, 기타)들을 사용하여 에밀전의 형성여부, 부피밀도, 중량, 기폭성, 순폭성, 폭속 등을 실험한 결과 OS가 첨가제로 가장 우수하였으며, 첨가제의 실험결과는 표 1과 같으며, 함유량별 특성에 대한 그래프는 그림 6과 같다.

표 1. 첨가제를 OS로 한 저폭속화약의 실험결과

NO.	1	2	3	4	5	평 균	비 고
Density (g/cm ³)	7.1	1.12	1.13	1.12	1.12	1.12	
	7.2	1.00	1.02	1.04	1.01	1.04	
	7.3	0.90	0.89	0.92	0.90	0.93	
	7.4	0.81	0.80	0.83	0.83	0.82	
	7.5	0.74	0.75	0.77	0.79	0.77	
	7.6	0.72	0.72	0.73	0.74	0.72	
	7.7	0.57	0.58	0.58	0.59	0.57	
Weight (g)	7.1	127.20	127.76	126.71	126.65	128.01	127.27
	7.2	113.33	115.53	117.43	114.98	116.14	115.48
	7.3	101.36	100.17	104.65	105.47	102.95	102.92
	7.4	91.68	90.28	93.69	94.34	91.58	92.31
	7.5	83.32	85.47	87.81	89.62	88.01	86.85
	7.6	81.56	81.85	82.63	83.97	81.99	82.40
	7.7	64.97	65.26	65.32	65.37	64.57	65.10
기 폭	7.1	기폭	기폭	기폭	-	-	-
	7.2	기폭	기폭	기폭	-	-	-
	7.3	기폭	기폭	기폭	-	-	-
	7.4	기폭	기폭	기폭	-	-	-
	7.5	기폭	기폭	기폭	-	-	-
	7.6	기폭	기폭	기폭	-	-	-
	7.7	기폭	기폭	기폭	-	-	-
순폭도 (air gap)	7.1	순폭	순폭	순폭	-	-	-
	7.2	순폭	순폭	순폭	-	-	-
	7.3	순폭	순폭	순폭	-	-	-
	7.4	순폭	순폭	순폭	-	-	-
	7.5	불폭	순폭	순폭	-	-	-
	7.6	불폭	불폭	불폭	-	-	-
	7.7	불폭	불폭	불폭	-	-	-

이익주, 김희도, 안봉도, 최성현, 임정혁

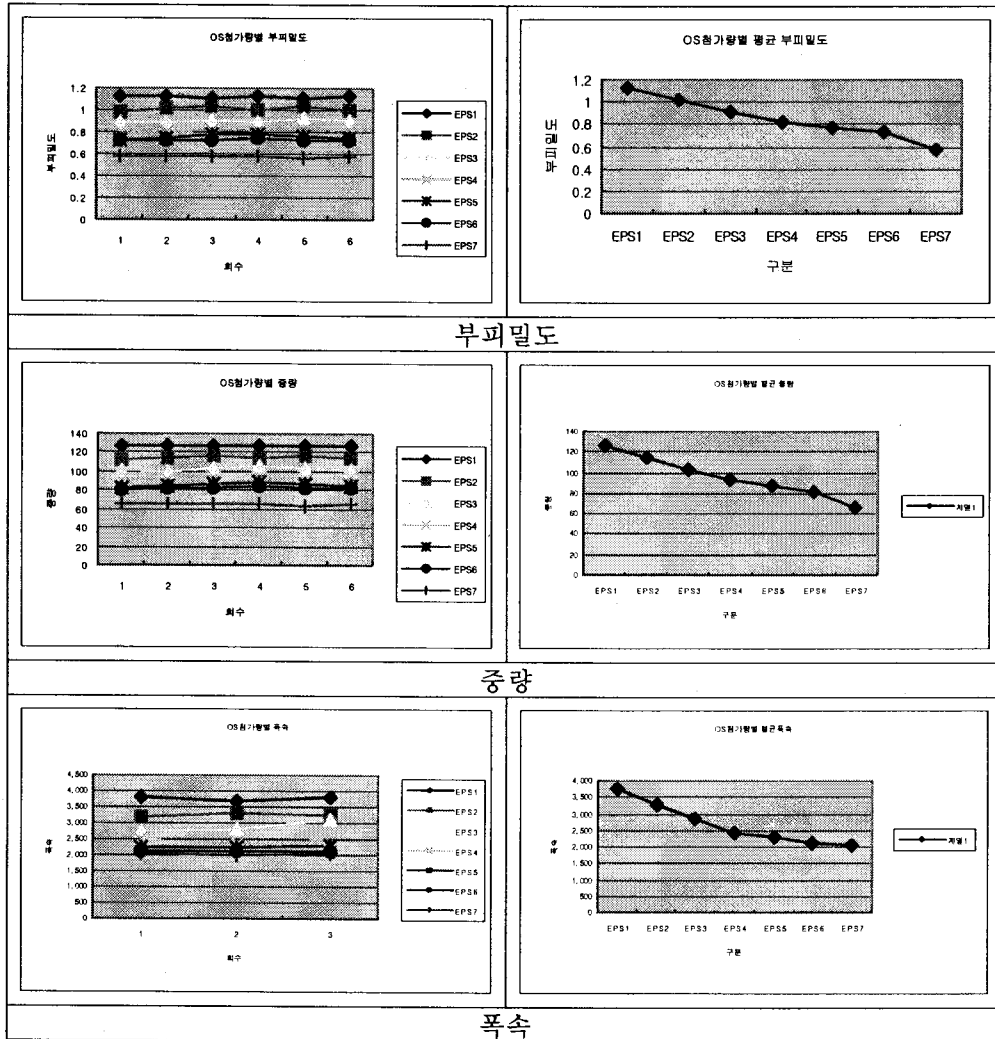


그림 6. 첨가제 함유량에 따른 저폭속화약의 특성

3. 저폭속화약 Kinecker의 특성

3.1 비에너지

원칙적으로 폭발에너지는 폭약이 폭발할 때 발생하는 고온, 고압 등을 고려한 에너지를 열역학적으로 구하는 것으로, 이를 특수 계산이라고 하며, 일반 물질과 화약류가 다른 점은 일반물질이 화학적 변화를 하기 위해서는 외부로부터 산소를 공급 받아야 하는데 비해서 화약류는 자체가 산소를 공급하거나 기폭의 도움으로 화학적 변화를 일으킨다는 점이다. 화약

류가 방출하는 에너지는 밀폐된 상태에서 화학적 반응으로 생성된 가스의 최종상태의 에너지이므로 시간적 개념은 없으며 화학반응이 빠르거나 늦거나에 따른 차이를 나타내지 못하는 결점이 있다. 화약이 폭발할 때 폭발가스의 압력을 p_1 , 그때의 가스가 점유하는 부피를 v_1 이라 하면 기체의 상태방정식에 따라 다음과 같은 관계식이 성립한다.

$$p_1 v_1 = nRT_1$$

위의 식에서 $p_1 v_1$ 나 nRT_1 의 값은 폭발이 폭발한 후 외부에 대하여 일할수 있는 능력을 에너지 차원으로 표시한 것이므로 화약의 힘(force of explosive)또는 비에너지(specific energy, f)라고 하며, 비에너지의 계산은 다음과 같이 한다.

화약 1Kg이 폭발할때의 생성가스 압력 $p_0=1$, 온도 $T_0=0^\circ\text{C}=273^\circ\text{K}$ 에서 얻어지는 용적을 v_0 라 하면 기체법칙으로부터 $p_0 v_0 = nRT_0$ 가 되고, 이것으로부터 $nR = p_0 v_0 / T_0 = v_0 / 273$ 이 된다. 이것을 $T_1 - T_0 = Q / nC_V$ 에 대입하면 비에너지 f 는 $f = nRT_1 = v_0 T_1 / 273$ 으로 표시되며 이 식의 단위는 atm-l이다.

상기식을 이용하여 에멀전과 저폭속화약의 비에너지 f 를 구하면 에멀전폭약의 비에너지는 $f = 880.73 \times 2234.19 / 273 = 7,207.15 \text{atm-l}$ 저폭속화약의 비에너지는 $f = 891.58 \times 2249.68 / 273 = 7,347.14 \text{atm-l}$ 가 된다.

3.2. 폭발압력

폭약1Kg의 부피를 $v_0(l)$ 라하고 폭발압력을 $p_1(\text{atm})$ 라 하면 비에너지 f 는

$$f = p_1 v_0$$

양면을 v_0 로 나누면

$$f/v_0 = p_1 = f \rho_0$$

여기서, $\rho_0 = 1/v_0$ 이 된다. ρ_0 는 kg/l, 즉 g/cc의 의미로 폭약의 밀도이고 이것을 장약밀도라 한다. 폭발생성가스를 이상기체로 취급하여 폭발압력을 계산하면 진정한 값보다는 대단히 적으며, 다음과 같은 식으로 계산되어 진다.

$$p_1 = \rho_0 \cdot f$$

고체인 폭약의 부피를 그대로 하고 폭발하여 기체로 되었을 때 기체분자가 자유로운 운동을 할 수 있는 공간은 실 용적만큼 작아지게 되므로 폭발압력은 다음과 같이 수정된다.

$$p_1 = f / (v_0 - \alpha) = \rho_0 \cdot f / (1 - \alpha \rho_0)$$

화약류의 폭발압력을 구하기 위해서 화약 조성물에 따른 반응결과를 알아야 하며 이는 화약류의 반응결과 분석 프로그램인 Dyno nobel의 Nitro dyne 프로그램을 이용하여 구하면 저폭속화약은 에멀전폭약에 비해 폭발압력이 25.90% ~ 47.27%의 감소를 보이고 있다. 그림 7는 화약류의 조성물에 따른 반응 결과를 나타내며, 표 2은 에멀전폭약과 저폭속화약

이익주, 김희도, 안봉도, 최성현, 임정혁

의 폭발압력을 나타내고 있다.

표 2. 에멀전폭약과 저폭속화약의 폭발압력비교

구 분	화약력 (f)	코볼륨값 (α)	폭약밀도 (ρ _o)	이론 폭발압력	보정 폭발압력	Nitro Dyne 계산 폭발압력
에멀전폭약	7,207.15	0.544	1.135	8,180	21,380	25,224
저폭속화약	7,347.14	0.633	0.825	6,061	12,686	13,301

구 분	이론 폭발압력	감소비율 (%)	보정 폭발압력	감소비율 (%)	Nitro Dyne 계산 폭발압력	감소비율 (%)
에멀전폭약	8,180	0	21,380	0	25,224	0
저폭속화약	6,061	25.90	12,686	40.66	13,301	47.27

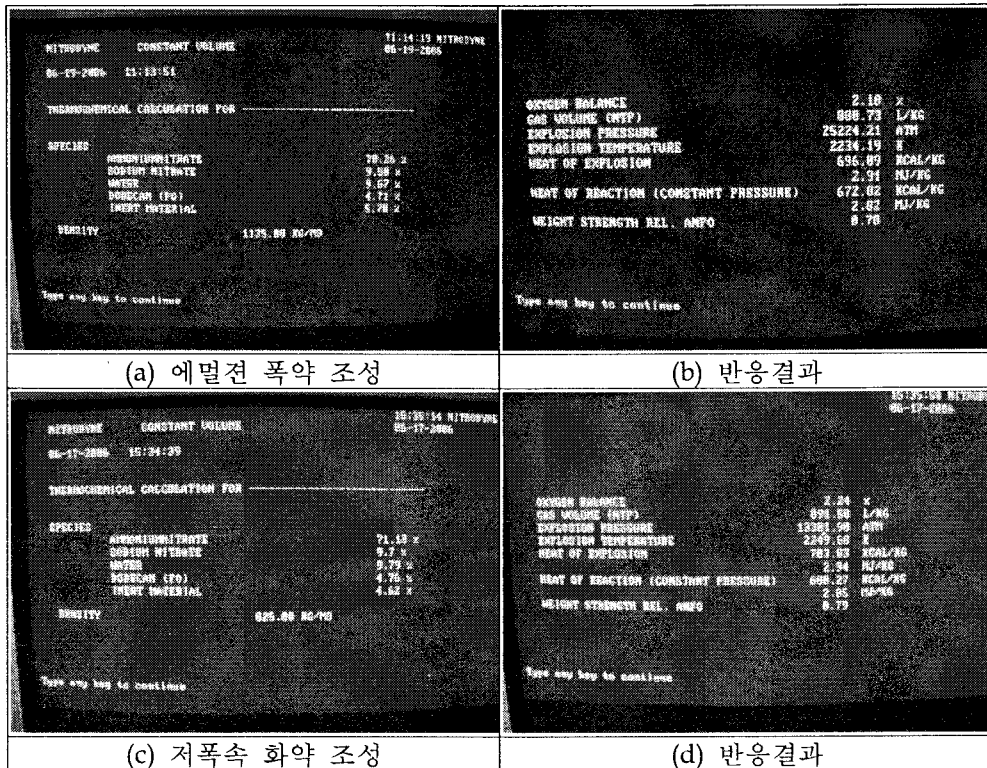


그림 7. Nitro dyne을 이용한 화약의 조성에 따른 반응결과

3.3 장약공내 작용압력

장약공내에 발생된 폭발압력은 암석의 인장강도보다 크고 압축강도보다 작게 되는 범위를 필요로 하며 공과 공사이에 발생된 균열 침단 압력이 인장강도보다 약간 크다는 조건을 될 수 있으면 길게 지속시키는 것이 필요하다.

장약공내 폭발압력은 Abel-Nobel의 상대방정식에 의해 계산된다.

$$P_s = \frac{f \cdot L}{V - \alpha \cdot L}$$

$$\alpha = \frac{1.5}{1.33 + 1.26\rho_e}$$

여기서, P_s : 장약공내 작용압력(kgf/cm²), f : 화약력($l \cdot \text{kgf/cm}^2/\text{kg}$), L : 약량(kg),
 V : 공내용적(l), α : 코볼륨값($l \cdot \text{kg}$), ρ_e : 폭약의 가비중(kg/l)이다.

또한, 천공내 작용압력을 decoupling계수(공경/약경)의 관계로 구하면 다음과 같다.

$$P_s = \frac{f}{\left(\frac{\Phi_b}{\Phi_e}\right)^2 \frac{1}{\rho_e} - \alpha}$$

여기서, Φ_b : 장약공경(mm), Φ_e : 약경(mm)이다.

표 3는 약경을 동일하게 한 에멀전폭약과 저폭속화약 Kinecker의 장약공내 작용압력을 나타내고 있다. 에멀전폭약에 비해 저폭속화약이 공내작용압력이 26.93% ~ 33.25%의 감소를 나타낸다.

표 3. 에멀전폭약과 저폭속화약 kinecker의 공내작용압력비교

구 분	약경	화약력 (f)	약량 (L)	공내용적 (V)	코볼륨값 (α)	폭약가비중 (ρ _e)	공내작용 압력 (P _s)	decoupling 이용 공내작용압력 (P _s)
에멀전폭약	17mm	7207.15	0.25	1.59	0.544	1.135	1239	1277
저폭속화약	17mm	7347.14	0.167	1.59	0.633	0.825	827	933

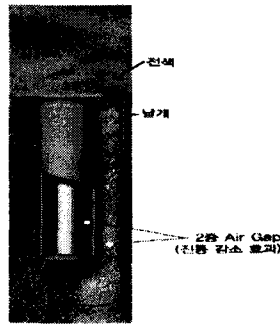
이익주, 김희도, 안봉도, 최성현, 임정혁

구 분	공내작용압력 (Ps)	감소비율 (%)	decoupling계수이용 공내작용압력(Ps)	감소비율 (%)
에멀전폭약	1239	0	1277	0
저폭속화약	827	33.25	933	26.93

3.4 Kinecker 특성

가. 개요

Kinecker는 폭속 2,000 m/s의 비교적 저폭속인 화약을 이용하여 미진동 발파를 목적으로 개발된 제품이다. 철포현상을 억제하여 소음발생을 줄였고, 인위적으로 2중 air-pocket을 만들어 decoupling 효과를 최대한 이용함으로써 충격파의 위력을 약화시켜 암반으로 전달되는 진동을 대폭 감소시킨다.



● 2중 Air Gap을 이용한 진동감소

그림 8. Kinecker

나. 원리

폭약의 폭발에 의하여 발생한 초기 충격파는 장약공을 중심으로 방사 상태로 바깥쪽을 향하며, 이 충격파는 일반적으로 hoop stress라고 일컬어지는 접선방향의 인장응력을 발생시킨다. 이 작용에 의해 장약공을 연결하는 면에 파단면을 발생시킨다.

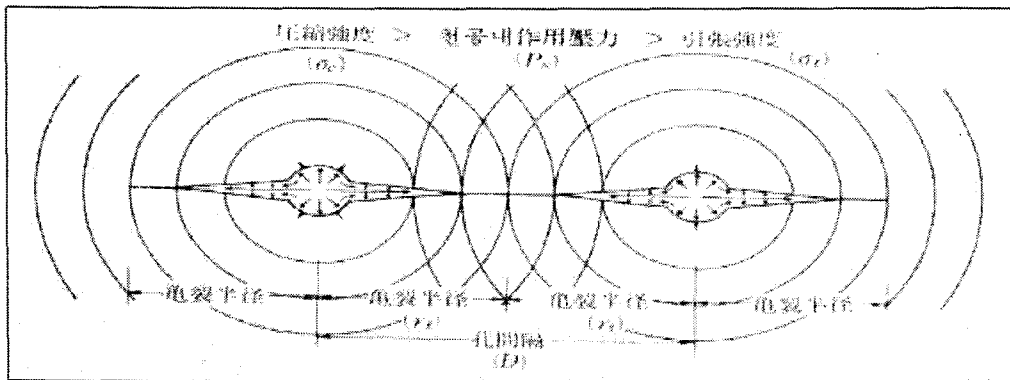


그림 9. 압반 파단면 발생 원리

Kinecker는 2중으로 구성된 용기를 날개달린 cap을 이용하여 천공 중심부에 위치되게 하고 decoupling효과를 이용할 수 있는 air-cushion을 형성시킴으로써 초기 발생하는 충격파를 제어하는 원리로 되어있다.

전색은 일반 모래전색을 실시하며 기폭은 순발 전기뇌관을 사용하여 동시에 기폭하는 것이 효과적이나 진동제어 수준에 따라 MS뇌관을 사용하여 지발당장약량의 최소화로 진동감소효과와 시공상의 편의를 도모하였다.

Kinecker의 제원과 패턴별 천공조건은 다음과 같다.

표 4. Kinecker의 제원과 성능

약경 (mm)	32
약장 (mm)	300
본당중량 (g/ea)	50
포장수량 (ea/box)	100
순중량 (kg/box)	5
폭속 (m/s)	2,000
가비중 (g/cc)	0.70~0.80
폭발열 (kcal/kg)	650
낙추감도 (cm)	100
가스량 (l/kg)	640
내한성 (℃)	-20
내수성	최우수

표 5. Kinecker 시공 패턴

TYPE	계단높이 (m)	천공장 (m)	천공간격 (m)	저항선 (m)	공당장약량 (kg/hole)
I	1.00	1.10	0.40	0.40	0.05
II	1.30	1.50	0.60	0.50	0.10
III	1.50	1.80	0.60	0.60	0.15
IV	1.80	2.10	0.70	0.60	0.20

4. 결론

본 논문은 에멀전폭약에 첨가제를 혼합하여 폭속 및 에너지가 대폭 낮아진 저폭속화약 Kinecker의 제조 및 특성에 대하여 언급하고 있으며, 저폭속화약 Kinecker의 특성에 대하여 검토해본 결과 다음과 같은 결론을 얻을 수 있다.

1. 저폭속화약 Kinecker의 가장 적당한 첨가제는 여러 실험을 실시한 결과 OS이 가장 우수한 것으로 나타났다.
2. 저폭속화약 Kinecker는 기존 에멀전폭약보다 폭발압력이 이론상 40.66%, Nitro dyne프로그래프 계산상 47.27%의 감소가 나타났고, 공내작용압력 또한 33.25%의 감소를 나타내었으며, 폭속은 52.88% 이상 낮출 수 있다.
3. 저폭속화약 Kinecker는 제조에 있어서 첨가제의 함유량 조절 및 에멀전의 형성이 상당히 어려우나 최적의 배합비를 구성하여 위력을 완화하고 디커플링효과를 통한 Air gap을 이용하여 2중 완충효과를 고려한 제품이다.
4. 저폭속 화약인 Kinecker 제품은 최근 발파현장에서 급증하는 민원예상지역과 도심지 및 보안물건이 근거리에 위치한 미진동 구간에서 발파진동 감소효과와 효율적인 시공 측면에서 사용이 증가할 것으로 판단된다.

참고문헌

1. Jaimin Lee and Per-Anders Persson, 1990, "Detonation Behavior of Emulsion Explosives", Propellants Explosives Pyrotechnics, 15, pp. 208-216.
2. K. F. Keirstead, D. De. Kee, 1985, "Effect of Bubble Dimensions on Shock Sensitivity in Gelled Slurry Explosives", Ind. Eng. Chem. Prod. Res. Dev. 24, 134p.
3. A. W. Campbell, W. C. Davis and J. R. Travis, 1961, "Shock Initiation of Detonation

- in Liquid Explosives", Phys. Fluids, 4, pp. 498-510.
4. Instanfel, "Vodmate operator manual", 2-1
 5. 김재극, 2002, "改訂版 産業火藥과 發破工學", 서울대학교 출판부, pp. 20-21.
 6. 인하대학교 교수 윤 지선 역, 1998, "最新 發破技術", 구미서관, 55p.
 7. 양형식, 김남수, 최미진, 김종관, 김희도, 안봉도, 2006, "Kinecker 암발파의 진동발생 특성 연구", 한국암반공학회 창립 25주년 기념 심포지엄, pp. 249-251