

## 화약의 폭속이 발파에 미치는 영향 검토

이승찬<sup>1)</sup>

### The Influence of the Detonation Velocity of Explosive in Blasting

Seung-Chan Lee

**Abstract** : The detonation velocity is the rate of propagation of a detonation in an explosive. An explosive's velocity of detonation(VOD) can be used to indicate a number of important characteristics regarding the product's performance under specific field and test conditions. Also, it is useful quality monitoring technique and can be measured accurately and easily at borehole and testing sites. This paper discusses the relevance of the detonation velocity of explosives in blasting. Attempts were made to classify detonation velocities and offer an interpretation of blasting process which will be useful to blasting engineers. But it was found that there is not necessarily a direct relationship between detonation velocity and explosive quality or efficiency.

**Key words** : detonation velocity, blasting, blasting process, relationship

**초 록** : 폭속은 화약에서 폭굉의 전파속도이다. 화약의 폭굉 속도는 발파 환경이나 시험 조건 하에서 제품의 성능과 관련된 주요한 변수로 사용되고 있다. 또한 발파현장이나 시험장에서 가장 용이하게 측정할 수 있는 화약의 특성치이며 또한 정확한 수치로 측정 할 수 있어 품질 평가 도구로 사용되고 있다. 이 논문에서는 발파에 있어서 폭속과의 관련성을 논의 및 분석한다. 발파 기술자에게 유용하게 사용 될 수 있도록 폭속과 발파 공정과의 관련성을 정밀히 검토해보았다. 그러나 폭속과 폭약의 품질, 효율성과는 직접 관련이 없는 것으로 나타났다.

**핵심어** : 폭속, 발파, 발파공정, 관련성

## 1. 서 론

화약은 수십 년 동안 암석 굴착용으로 사용되어 왔다. 또한 화약의 특성에 대하여 화약 제조사들은 폭속, 비중, 폭발열, 가스량 등을 측정 혹은 계산하여 소비자들이 화약을 용이하게 선정할 수 있도록 제시하고 있다 (Table 1 참조).

통상 제품 카탈로그에 제일 먼저 제시되고 있는 폭속(velocity of detonation 혹은 detonation velocity라 칭함)이 빠르면 폭약의 성능이 좋고 폭속이 낮으면 폭약 성능이 나쁜 것으로 판단하는 경향이 있다. 그리고 강한 암에는 폭속이 높은 다이나마이트, 석회석같이 약한 암에는 폭속이 낮은 안포(ANFO)를 사용하는 것으로 인식하고

있다. 하지만 현재 다양한 종류의 폭약의 구입이 가능하고 판매되고 있어 암석의 종류, 발파의 용도(파쇄, 히브, 파쇄와 히브 복합용도)에 따라 적합한 폭약을 선정, 사용하는 일이 용이하지 않은 시대가 되었다. 또한 현재 과학 기술의 발달로 발파공에서 실제적으로 폭속의 측정이 가능하게 되었다. 발파공에서의 폭속 측정 결과는 발파 및 사용한 폭약의 각종 정보를 제공해주지만 발파에 있어서 잘못된 결론을 도출할 수도 있으므로 이 논문에서는 폭속과 관련된 여러 가지 정보를 제공하고 폭속이 암석발파에 미치는 영향에 대하여 소개하고자 한다.

## 2. 화약 기본 이론 개설

### 2.1 기본 개념

먼저 화약의 물리적인 성질과 조성이 발파에서 에너지 방출 속도에 어떤 영향을 미치는지 화약에

1) (주)한화 인천공장  
접수일 : 2005년 9월 16일

Table 1. Properties of explosives from Hanwha corporation<sup>1)</sup>

제품명	평균폭속 (m/s)	탄동구포 (%)	가비중 (g/cm <sup>3</sup> )	폭발열 (kcal/kg)	낙추감도 (cm)	가스량 (ℓ/kg)	내한성 (°C)	내수성
메가맥스	6000	160	1.2~1.3	1300	100	865	-20	매우 우수
메가마이트 I	6100	170	1.3~1.5	1152	50	880	-20	우수
뉴마이트플러스II	5700	135	1.2~1.3	1100	100	736	-20	매우 우수
뉴마이트플러스I	5700	120	1.1~1.2	880	100	826	-20	매우 우수

대한 일반적인 개념을 설명한다.

화약은 급격한 반응에 의해 고압의 가스를 생성할 수 있는 화합물이라고 정의되어 있다. 화약 성분은 산소 원자와 반응 시 연소하여 대량의 열을 발생시킬 수 있는 탄소, 수소, 황, 알루미늄 혹은 다른 금속성분과 같은 연료성분을 포함하고 있다. 통상 산업용 화약은 반응 후 물, 이산화탄소, 질소, 산화알루미늄과 같은 금속산화물이 생성된다.

모든 화약에는 화약의 성능에 영향을 주는 4개 화약특성치가 있다; 첫째는 에너지인데 모든 화약의 각 성분은 반응공정을 유지시키기 위해 충분한 잠재적인 화학에너지를 가지고 있어야 한다. 반응에

의한 에너지의 방출속도가 주위로 소모되는 에너지 손실보다 많아서 반응을 계속 진행시키기에 충분해야 한다. 둘째는 친밀도(intimacy)로 화약내 산소원자와 연료원자와의 친밀도를 의미한다. 셋째는 밀도로 각 성분이 반응, 생성물을 생성하기 위하여 원자들을 재배열하여 핫스팟(hot Spot)을 생성하기 위한 보이드(voids) 혹은 자유공간이 확보되어야 한다. 고압력 충격파(폭굉파)가 화약에 다가오면 보이드 혹은 가스 불륨은 수천바의 압력에 의해 압축된다. 이 급격한 압축은 핫스팟 안에 있는 가스의 온도를 수천도 까지 상승시키고 주위의 고체나 연료성분을 증발, 반응이 시작된다. 이

### 폭굉 메커니즘(Mechanics of detonation)

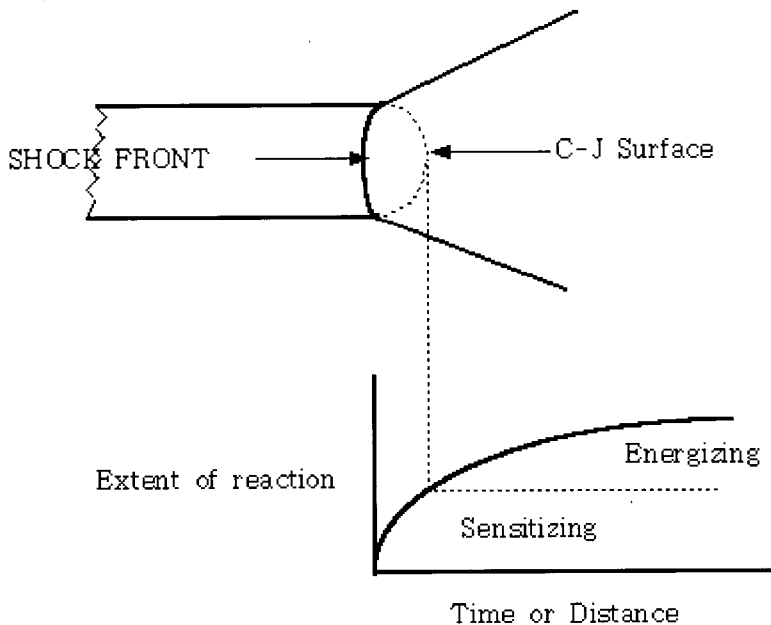


Fig. 1. Release of energy within and behind the detonation reaction or C-J zone.

것이 폭발반응을 진행시키는 핫스팟 이론이다. 또한 이 자유공간은 성분들을 루주하게 만들고 산소원자와 연료원자들을 쉽게 확산 서로 접촉하여 반응을 진행할 수 있도록 한다.

마지막으로 예감성(sensitivity)인데 이 성질은 반응을 개시, 유지하기 위해 요구되는 에너지 자극 수준을 의미한다.

**2.2 폭굉 메커니즘과 폭약에너지**

폭약의 에너지는 폭약의 제일 중요한 요소이지만 에너지 방출 속도(폭속) 또한 암석 파쇄와 히브에 영향을 주는 요인 중의 하나이다. 폭약의 조성 과 물리적 성질이 에너지 방출속도에 어떤 영향을 주는지 부가적으로 발파에 어떤 영향을 주는지 폭굉 메커니즘에 대하여 간략히 설명하겠다.

Fig. 1은 폭약의 반응과 거리에 관하여 나타낸 것이다.<sup>3)</sup> 화학반응이 쇼크 프론트에서 시작되어 주어진 특정 속도로 전진한다. 이 속도는 폭약 및 원료의 물리적 화학적 성질에 의존하는데 분자화약 또는 화합화약, 액상, 캐스트, 압축, 입자 형태에 달려 있다. 또한 이 속도는 폭약의 비중과 입자 크기에 의존한다.

모든 반응이 Chapman-Jouget(CJ)면 앞에서 발생한다면 폭약은 이상적으로 폭굉 되었다고 말한다. 이것은 폭약이 가진 전 에너지가 폭굉파 전진을 위한 일을 하며 이 때 폭속은 최고치이다. 이 조건

하에서는 폭굉 압력은 최대이고 화약은 최고의 충격에너지를 방출한다.

화학반응이 CJ면 뒤에서 발생한다면 이 화약은 비이상적으로 폭굉 되었다고 말하는데 이와 같은 비이상적인 특성은 주어진 화약의 전체 열역학적 에너지가 감소된다는 것은 아니다. CJ면 뒤에서 방출된 에너지는 파쇄나 히브(heave)에 여전히 이용될 수 있다. 이 에너지의 일부는 폭굉파로 전환되지 못하므로 비이상적 화약의 폭속은 감소한다. 즉 다른 부분의 에너지로 저장, 전환된다. 화약의 비이상 정도는 예감영역에서 모든 에너지가 방출되는 이상적인 폭속과 실제 측정되는 폭속과의 차이로 판단할 수 있다.

고체화약(혹은 입자상)의 반응속도는 액상화약과 다르다. Fig. 2는 폭속과 티엔티(TNT) 혹은 안포와 같은 고체화약과 에멀전 혹은 니트로글리세린과 같은 액상화약의 장약경에 따른 폭속치를 그래프로 나타낸 것이다. 고체화약은 그레인(grain) 연소현상과 같이 폭굉 반응이 진행되기 때문에 시간이 지남에 따라 입자는 반응 표면적이 적어진다. 반대로 액상화약은 반응이 핫스팟으로 부터 구의 외부로 진행되므로 반응 표면적은 시간이 지남에 따라 증가한다. 결과적으로 액상폭약이 이상 폭속에 더 빨리 다다르고 이 특성을 이용하여 화약 개발자는 화약용도에 맞게 화약조성을 조정, 특수용도용 제품의 개발, 생산이 가능하게 되었다.

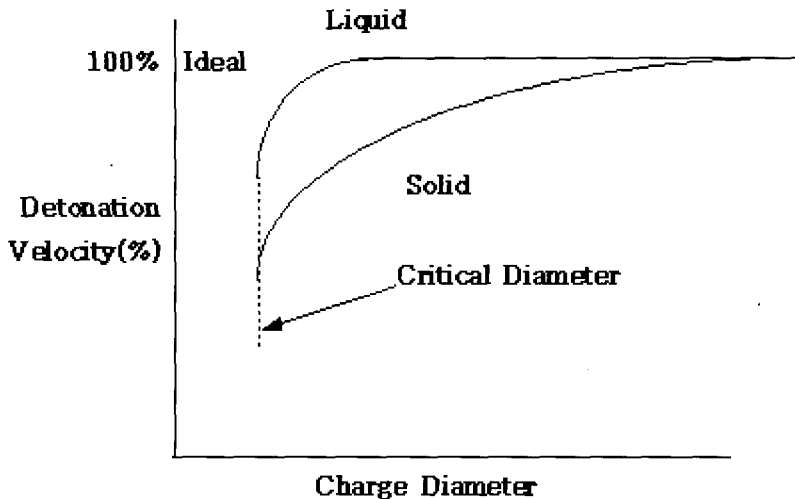


Fig. 2. Detonation velocity as function of charge diameter for typical solid and liquid explosives.

화약에서의 반응

산업용 화약의 예감성은 대부분 보이드(voids)에 의존한다. 보이드는 에멀전에서의 버블, 마이크로벌룬(micro balloon)으로 혹은 안포나 헤비안포, 프릴초안의 미세공, 다공성 혹은 고밀도 산화제분말의 격자사이에 있는 공간으로 존재한다. Fig. 3을 보면 보이드 공간으로 에너지물질의 압축은 히팅과 급속반응을 일으켜 보이드 주변과 내부에서의 이 반응은 폭굉파의 전진을 유지한다. 핫스팟이 반응한 후에 프릴초안과 같은 입자는 바깥으로부터 안쪽으로 연소한다. 이상적으로 설계, 혼합된 화약의 전체유효에너지는 적어도 핫스팟 혹은 그레인 연소(grain burning) 반응에서 발파 완료 전에 배출된다. 그러나 핫스팟이 없는 화약 부분은 연소하기 위해서는 많은 시간을 필요로 하며 이것은 발파 후에 배출되어 화약에너지의 손실로 나타난다. 이 손실은 ANFO에서 흡습한다던지 에멀전 폭약에서 에멀전이 파괴되어 AN 결정이 석출되는 것과 같이 핫스팟이 사라지기 때문이다. 따라서 화약은 Fig. 3과 같이 핫스팟(hot spots), 연소상, 손상된 부분으로 나누어야 한다.

이상 & 비이상 속도

화약 조성의 에너지와 밀도는 폭속에 영향을 준

다. Harries(1983)는 다음과 같이 이상폭속 계산식을 제안했다.<sup>4)</sup>

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

여기서, D : detonation velocity(km/s), K : heat of reaction(MJ/kg), ρ : specific gravity of the explosive, k : thermodynamic constant ~ 1.15

이 식은 에너지, 밀도, 실제 폭속을 알 때 비이상도를 판단하기 위하여 보통 사용된다. Table 2는 이 식을 사용하여 안포(ANFO)와 에멀전폭약의 이상속도가 밀도에 따라 어떻게 변화하는지를 나타낸 것이다.

또한 이 식을 이용하여 폭약의 폭굉에 사용되는 에너지의 양을 추론하는데 사용할 수 있다. Table 3은 한화에서 시판중인 메가마이트 I을 이 식을 이용하여 계산한 결과이다.

이 Table 3으로부터 메가마이트 I의 경우 폭속을 약 6100m/s로 제품 카탈로그<sup>1)</sup>에 제시하고 있으므로 폭속은 이상 속도의 약 85% 수준이며 화약 에너지의 70%가 폭굉에 이용되고 약 30%가 폭굉 반응 후 발파 시 방출된다는 것을 추론할 수 있다.

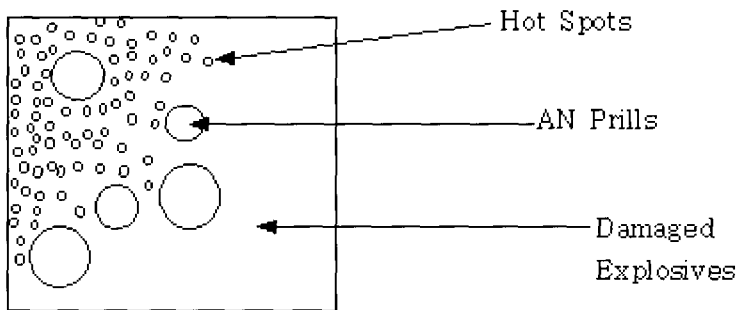


Fig. 3. Hot spots, burning phase and wasted material.

Table 2. Ideal detonation velocities

Explosive	Heat of reaction (MJ/kg)	Density(g/cc)	Velocity(m/s)
ANFO	3.8	0.75	4,480
		0.85	4,780
Emulsion explosives	3.0	1.10	4,910
		1.30	5,440

Table 3. Non-ideal explosives (MegaMITE I :  $\rho=1.4\text{g/cc}$ ,  $Q=4.82\text{MJ/kg}$ )

Velocity (m/s)	% Ideal velocity	% Energy in detonation
7230	100	100
6860	95	90
6460	89	80
6050	84	70
5600	77	60

**폭굉압(detonation pressure)**

폭굉압은 다음 식에 의해 정확하게 계산 할 수 있다.

$$P = \rho DW + P1 \tag{2}$$

여기서,  $W$  : particle velocity in reaction zone,

$P1$  : atmospheric pressure

통상 대부분의 화약은  $D/W = 4$ ,  $P1 \ll P$ 이므로 (2)식을 다음과 같이 쓸 수 있다.

$$P = (\rho D^2)/4 \tag{3}$$

$D$ 는 화약의 최초  $\rho$ 의 함수이므로 화약 개발자는 용이하게 화약의 최초 밀도를 낮춤으로 폭굉압을 낮출 수 있다. 따라서 폴리스티렌 수지와 같은 저비중 물질을 넣어 특수한 용도의 제품을 생산할 수 있다. 예를 들면 일본화약의 저비중 ANFO(초안유제폭약 L type)나 일본 육화성은 Mild ANFO를 생산, 판매하고 있다. 이 화약은 약장전공 주변 압 분쇄에 소모되는 에너지가 적으므로 제어발파나 채석발파에 주로 사용되고 있다. 이 화약의 단점은 화약의 밀도가 낮으므로 적은 양의 화약이 공에 주입되므로 사용 시 많은 공을 천공하여야

한다. 또한 산소 균형(oxygen balance)등 여러 가지 요소를 조합하여 열화학적 에너지를 증가시키기 위하여 알루미늄 같은 열 발생 물질을 넣을 수 있다. 알루미늄 분말의 입자가 CJ면 앞에서 반응할 만큼 충분히 작다면 폭속은 에너지가 증가함에 따라 폭속은 증가할 것이다. 그러나 일반적으로 산업용 화약 제조에 사용하는 알루미늄 분말은 반응영역(reaction zone)에서 완전히 반응하지 못하고 반응영역 뒤에서 반응하므로 폭속은 실제적으로 감소한다. 그러나 전체 화학반응에서 전체 에너지는 증대하므로 증대된 에너지는 압의 히브나 파괴에 이용될 수 있을 것이다. 예를 들어 미국 오스틴 파우더사(Austin Powder)의 에멀렉스(emulex)를 보면 알루미늄 분말을 투입하여 에너지를 증대한 제품의 경우 VOD 감소 경향이 Table 4와 같이 나타나는데 이러한 현상은 지극히 정상적이다.

만약 약 장전경이 커진다면 반응은 CJ면에서 일어난 것이고 보다 많은 에너지가 충격에너지로 변환될 것이다. 즉 Fig. 4와 같이 굵은 실선 부분과 같이 장약경이 작아지면 폭발에 기여하는 화약의 양이 감소하게 되고 따라서 폭굉에 필요한 에너지(Fig. 4의 삼각형 부분)가 적게 공급되어 폭속도 또한 늦어지게 된다.

Table 4. Emulex : Austin Powder<sup>5)</sup>

Product	Density(g/cc)	VOD, m/s unconfined	Detonation pressure (kb)	RBS ANFO=100
Emulex 710	1.17	5150	78	107
Emulex 720	1.17	5030	74	142
Emulex 730	1.19	4725	67	162

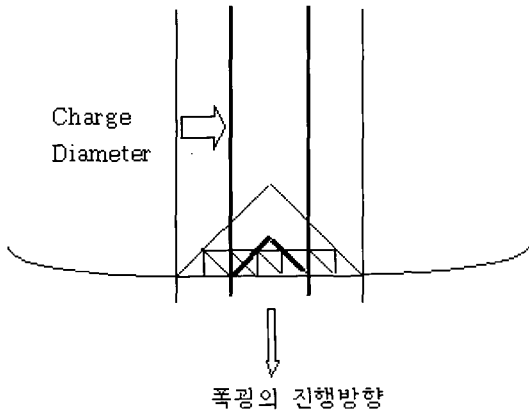


Fig. 4. Charge diameter vs energy.

이와 같이 화약의 입자 크기, 밀도, 조성, 장약경 등을 조정하여 폭속, 에너지 방출 등을 조정할 수 있다. 주어진 발파 환경 속에서 적절한 화약을 사용하여 발파 효율을 높일 수 있다.

**폭속의 순간적인 변동**

폭속의 순간적인 변동은 밀도차, 물의 진입이나 메지물에 의한 오염 등에 의해 야기된다. 밀도에 의한 폭속 변화-증가/감소는 일반적이다. 오염에 의한 것은 폭속 저하를 일으킨다. 화약이 발휘하는 정상 폭속보다 런업(run-up)과 런다운(run-down)하는 것은 프라이머(primer)의 과다, 과소에 의한 다. 통상 안포와 같은 벌크폭약의 과도한 프라이머 사용은 보기 어려운 현상이다. 과도한 프라이머 사용은 충격 및 파쇄에너지는 많이 발생하게 하지만 히브에너지의 손실 가능성이 있다. 하지만 프라이밍의 기본은 기폭 신뢰성이므로 과도한 프라이머 사용은 발파 실패 확률을 감소시킨다.

정확한 프라이머 사용을 위해서는 발파공에서 프라이머에 따른 폭속치를 연속식 폭속 측정기로 측정하여 기폭후 정상 폭속으로 상승하는 거리(런업 거리)를 장약경의 3배이내가 되도록 프라이머 사용량을 조정하여야 한다.<sup>6)</sup>

**2.3 화약 에너지의 분류**

Lownds(1990)는 암발파에서 암과 화약의 상호 작용을 간단한 모델을 사용하여 암 발파 공정에서의 화약에너지를 분류하였다.<sup>3)</sup> 그는 발파가 진행되는 동안 가스들의 압력과 부피를 가지고 에

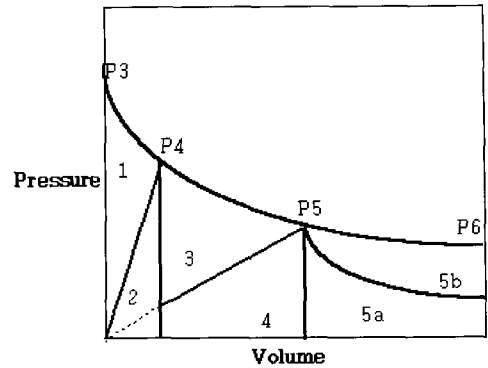


Fig. 5. Energy partition in blasting (P3 : explosion state pressure, equals peak shock pressure, P4 : end of shock pressure, P5 : pressure when gas begins to escape, P6 : atmospheric pressure, 1 : kinetic energy of shock wave, 2 : static energy of shock, equals strain energy in rock after passage of shock, 3 : dynamic energy during crack growth, 4 : strain energy in burden at release of burden, 5a : heave energy, 5b : energy lost in escaping gas, 2+3 : fragmentation energy).

너지를 분류하였다. 이 에너지 영역은 Fig. 5를 참조하라.

화약이 천공에서 폭발하면 초기 즉 P3 폭발상태에서 고압의 가스가 암으로 충격파를 보낸다. 천공 근처에 있는 이 충격으로부터 생긴 스트레스는 암의 인장강도나 압축강도보다 크다. 이 스트레스들은 폭발압력과 암 강도 및 단단함(stiffness)에 따라 다르지만 천공 근처에서 암의 압축과 분쇄를 유발한다. 암이 압축되고 분쇄되면 천공의 부피는 증대하고 압력은 암의 스트레스와 압력이 균형을 이루는 만큼 감소한다. 이 점을 천공 평형 지역(equilibrium borehole state)라 부른다. 이 팽창하는 동안 화약에 의해 행해진 일은 맹도(brisance) 에너지라고 부르며 영역1의 충격파 운동에너지와 영역2의 암에 저장된 스트레인 에너지로 구성된다. 운동 충격에너지는 천공 주변의 암을 깨고 진동(seismic)파로 주변의 암으로 전파해 나가며 손실된다. 잔여 공 압력 P4에 의해 암에 있는 스트레인은 균열을 일으킨다. 폭발 생성 가스는 공과 자유공간사이에 틈으로 들어가 파괴를 일으키고 히브에 기여한다. 이 공정은 가스가 버딘을 통하여 자유공간에 다다를 때 끝이 나는데 이 가스의 압

력이 P5이다. 이 시점에서 버던은 가스에 의해 압축되고 스트레인 에너지(4영역)는 암에 저장된다. 이 에너지는 파쇄와 히브에 무의미한 에너지로 여겨진다. 영역과 4영역에서의 에너지는 암발파에 가장 유용한 에너지이며 파쇄에너지라 부른다. 탈출시점(영역5)에 있는 가스들의 일부 에너지는 버던을 움직이고 히브에너지로 나타난다. 그러나 영역5 에너지의 나머지는 배출되는 후가스의 소음, 열로 손실된다. 이 모델이 비록 너무 간단하게 나타낸 하나의 모델이지만 폭발 초기에서 대기압으

로 팽창하는 가스들의 에너지를 비교, 분류하여 비교표를 제시한다. 여기에서 유용한 에너지는 파쇄와 히브 에너지이다. 발파공정에서 효율적으로 화약을 사용하기 위한 에너지 손실을 최소화하도록 설계하는 것이 중요하다.

### 3. 폭속 측정 방법

오늘날 폭속 측정은 통상 point-to point와 continuous 방법 등 2가지 방법이 사용되고 있다.

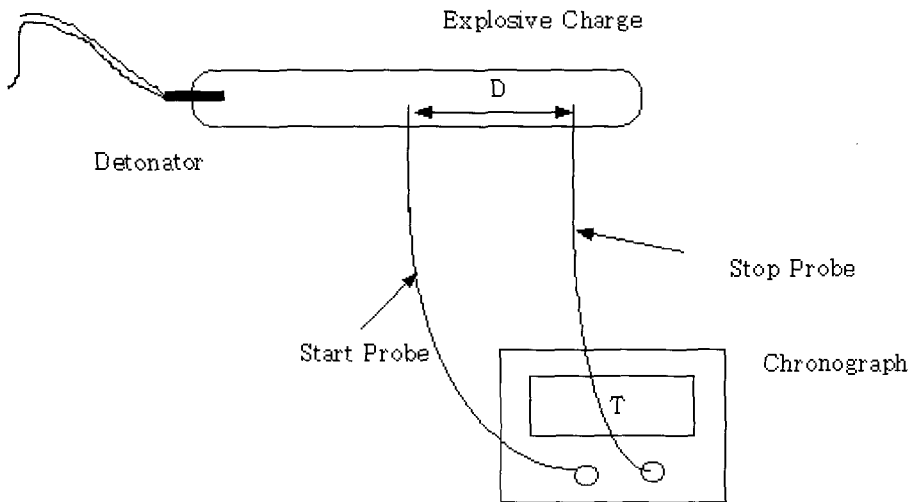


Fig. 6. Electric point-to-point VOD setup.

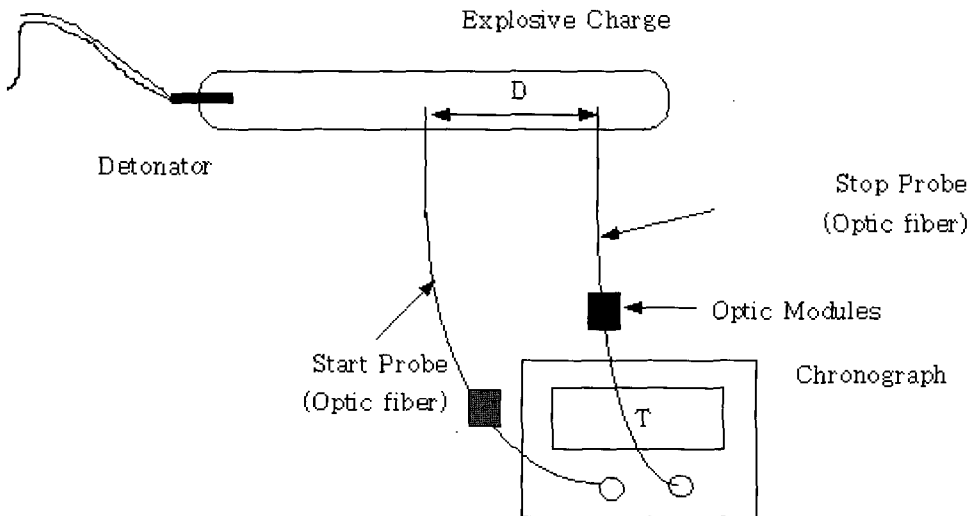


Fig. 7. Optic point-to-point VOD setup.

**3.1 point-to-point 폭속 측정법**

Point-to-point 폭속 측정법은 화약에 정해진 거리를 띄고 전기선이나 광파이버를 끼워 측정하는 것이다. 각 센서에서 감지한 시간간격을 가지고 폭속을 측정하는 방식이다. 센서는 전기 혹은 빛을 감지하는 것이 일반적이다. 이 방식은 화약의 평균 폭속을 측정하는데 이 방식은 통상 제조사에서 많이 사용한다(Fig. 6, 7 참조).

방식으로 통상 고저항 와이어를 이용한다. 즉 화약이 기폭 됨에 따라 고저항 와이어의 길이가 짧아지고 저항이 줄어드는 속도로 폭속을 계산하는 방식이다. 이 방식은 통상 장약공에서 화약 장약 구간간의 폭속 측정이 가능함으로 프라이머 효과나 폭속의 증, 감속 등의 측정이 가능함으로 현장 발파공에서 직접 데이터를 측정하여 발파의 효과나 화약이 효율성 등을 판단할 수 있다. Fig. 8은 측정 방법을 나타내고 Fig. 9는 측정 결과이다.

**3.2 continuous 폭속 측정방법**

이 방식은 전체 장약된 화약의 폭속을 측정하는

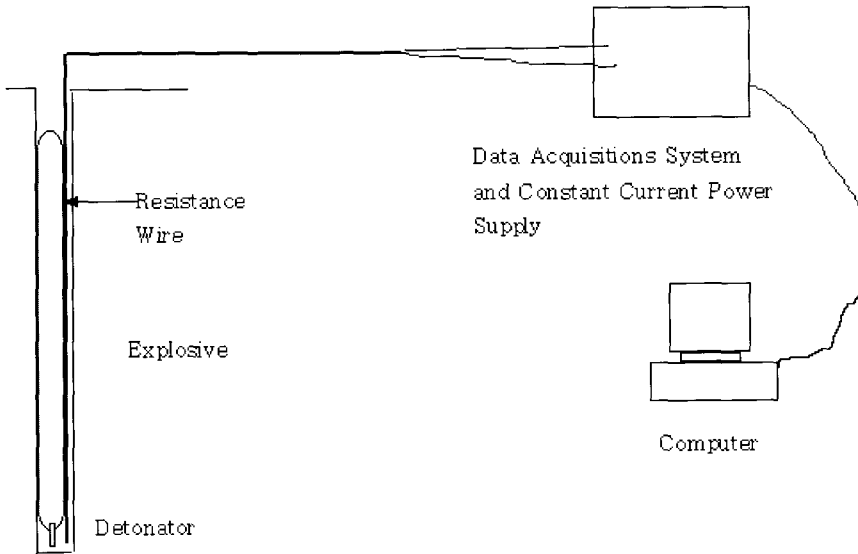


Fig. 8. Continuous VOD for explosive charge.

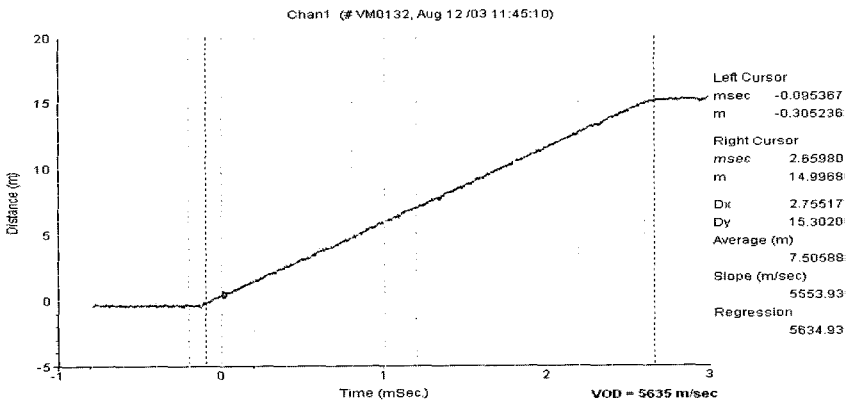


Fig. 9. The result of continuous VOD.



#### 4. 폭속이 발파에 미치는 영향 평가

발파에 미치는 폭발속도의 영향을 평가 혹은 해석하기 위해서는 암석 발파 공정의 단순한 모델이나 폭발 반응 공정이 도입되어야 한다. 폭속은 천공장에 따라 일시적 혹은 안정적일 수 있다. 화약 자체로는 이상적이나 비이상적으로 구분할 수 있으며 암의 단단함(stiffness)과 강도로 보면 높거나 낮다고 할 수 있다.

폭발속도는 얼마나 많은 에너지가 초기 반응에서 방출되는 것을 의미한다. 발파는 통상 폭발충격파가 화약 칼럼을 통해 전파 → 주위 암석에 충격파 생성 → 크랙 생성 및 성장 → 버던 이동으로 구분할 수 있다. 크랙의 생성 및 성장은 중요한 메커니즘이고 파쇄와 결합되어 있다. 히브는 벤치발파를 위하여 토우에서 버던의 이동을 포함한다. 4가지 기본단계에서 폭발, 쇼크, 파쇄, 히브는 중첩된다. 그러나 각 단계를 구분시켜 검토하는 것이 유용하다고 생각한다. 이 개념은 타임 스케일(time scale), 각 단계의 지속시간을 조사함으로써 정립할 수 있다.

##### 4.1 화약 성능 발현의 타임 스케일(time scale)2)

###### 폭굉

폭굉 반응영역은 장약반지름과 동등 혹은 작다고 생각된다. 300mm 공에서의 5000m/s인 화약을 생각해보면 폭굉 반응영역(반응영역에서 물질의 압축은 무시)은  $0.15/5000 = 30 \mu\text{s}$  이 되고, 이 시간은 장약경에 비례하므로 폭굉 반응영역은  $0.1 \mu\text{s}$  /장약경(mm) 으로 나타낼 수 있다.

###### 충격파

충격파의 두께는 실험 혹은 이론적으로 추론할 수 있는데 Tidman과 Grant(1987)는 얇은 판에서 측정하여 스트레스 펄스 기간은  $5 \mu\text{s}$ (공경 : 25mm), 즉 충격 기간은  $0.2 \mu\text{s}$ /장약경 으로 표현하였다.<sup>7)</sup> McHugh(1983)는 스트레스 펄스 기간은  $6 \mu\text{s}$ (공경:12mm)로 계산하였고 실제 측정 시 스트레스 펄스 기간은  $200 \mu\text{s}$ (공경:100mm), 충격기간은  $2 \mu\text{s}$ /천공경로 측정되었다.<sup>8)</sup> 이것은 실제 발파에서 천공에 장착한 센서로 측정한 스트레인펄스는 좀 더 길었는데 장약장이 길었고 암을 통하여 집중됨에 따라 스트레스파가 길어졌기 때문이다. 따

라서 충격파 생성 시간은  $1 \mu\text{s}$ /장약경(mm) 이 된다.

###### 파쇄(fragmentation)

파쇄 에너지 지속 시간은 다홀 발파에서 지연효과로부터 추론할 수 있는데 Winzer(1983)는 일열 발파에서 공간의 지연초시가  $80 \mu\text{s}$ /장약경 mm (5 ms/burden(m))일때 가장 좋은 파쇄를 얻을 수 있다고 하였으며,<sup>9)</sup> Bergman(1983)의 경우 파쇄는  $1 \text{ms}/\text{burden}(\text{ft})$ (  $30 \mu\text{s}$ /천공경(mm)) 보다 길 때 개선되지 않는다고 주장하였다.<sup>10)</sup> 따라서 파쇄 에너지 지속 시간은  $50 \mu\text{s}$ /천공경(mm) 으로 추론할 수 있다

###### 히브(Heave)

히브공정은 버던의 첫번째 행동까지 활성화되는 것으로 가정할 수 있다. 아마 가스들이 버던을 밀어 빠져 나갈 때 보다 약간 길 것으로 생각된다. Chiapetta(1993)는 이 기간은 상당히 많은 차이가 있지만 통상  $1.5 \text{ms}/\text{버던}(\text{ft})$  라고 발표했는데,<sup>11)</sup> 버던이 천공경의 30분의 1이므로 히브 에너지 지속 시간은  $150 \mu\text{s}/\text{천공}(\text{mm})$ 로 표현할 수 있다. 하지만 이 수치는 암종류나 버던에 따라 변경될 수 있다. 실제 중요한 점은 어떤 단계에서 폭약에너지가 나타나는가이다. 폭약이 비이상적으로 폭굉 시 폭약에너지는 폭굉, 충격파 발생단계, 파쇄 단계, 히브단계에서 배출 될 수 있다.

위에서 계산한 타임스케일을 Fig. 9로 나타내보았다.

##### 4.2 화약 에너지의 배출

최근 화약 성능 측정은 이러한 종류의 화약에 대한 좋은 증거를 제시한다. Cameron 과 Grouhel (1990) 은 Table 5와 같이 두 종류의 헤비안포의 성능을 평가하였다.<sup>12)</sup>

Table 5에서 제시된 화약1은 A형이고 화약2는 C형을 나타낸다. 또한 슬러리폭약의 노화(경시)를 연구하였는데 이 결과를 Table 6에 나타내었다.

이것이 E형의 예이다. 15개월 경과 시까지 폭속은 상당히 높게 유지되나 화약 위력은 급격히 감소하였다. 따라서 폭속치로 화약 성능을 유추하는 것은 불가능하다. 이것은 다소 극단적인 예이다.

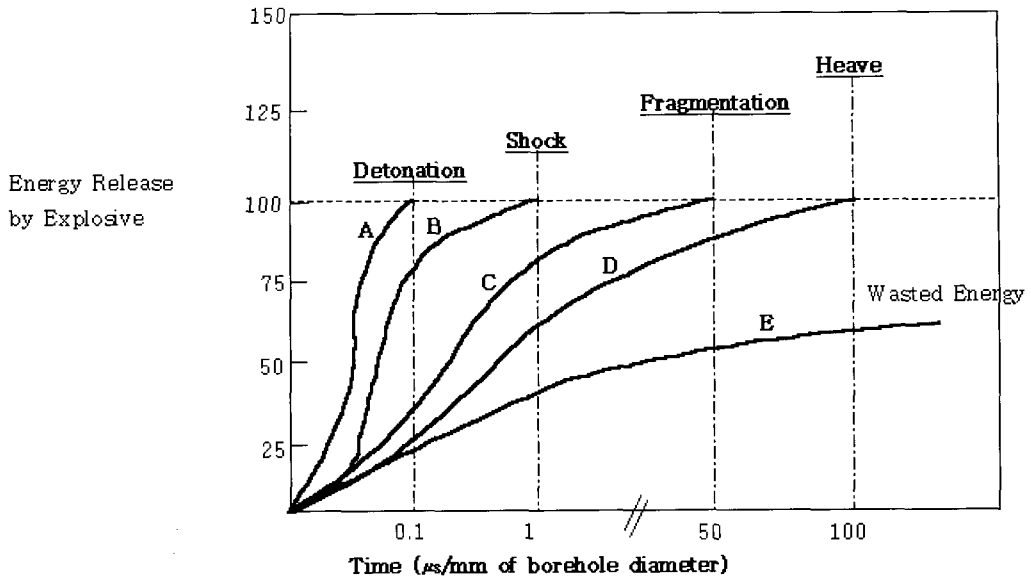


Fig. 9. Explosives reaction and rock response(A : ideal explosive, B ~E : non-ideal explosives; A, B : high shock(good for frgmentation in brittle rock), C : intermidiate(good frgmentation and good heave), D : high heave(good for soft rock and cast blasting), E : poor performance-energy wasted)).

Table 5. The performance of heavy ANFO performance

Explosives	Density	VOD(m/s)	Burden velocity (m/s)	Underwater tests	
				Shock%	Bubble%
1	1.06	5200	115	100	95
2	1.10	5000	155	97	100

Table 6. Long term stability for slurry explosives(품명 : 합수 폭약 (P13) 25mm)<sup>13)</sup>

기간	제조직후	3 개월	6 개월	9 개월	12 개월	15 개월
폭속(m/s)	4762	4651	4545	4444	4255	3846
대비 %(경시/ 직후)	100	98	95	93	89	81
탄동구포(%)	114	112	108	101	100	40
대비 %	100	98	95	89	88	35

화약은 장기간 저장함에 따라 처음에는 B, 점 접 C, D를 거쳐 E형에 도달하는 것으로 예상되는데 모든 판매되고 있는 폭약은 장기저장에 따른 성능 변화-화약의 유형 변화-가 예상되므로 발파실패가 없도록 장기저장에 따른 화약의 유형변화를 정확히 파악하여야 한다.

**4.3 발파에 대한 폭약의 폭속 영향 검토**

폭속이 높은 제품은 거의 이상적인 상태에 근접하다는 것을 의미한다. 이러한 제품은 폭굉 초기에 모든 에너지가 방출된다는 것이다. 폭속이 낮은 폭약은 비이상적이지만 에너지가 순차적으로 폭굉 이후에 방출된다. 따라서 발파 목적에 적합한 폭약의 선정이 필요한데 발파 목적이 파쇄인지 히브 인지를 명확히 하여야 한다.

히브 목적 발파의 경우 충격, 파쇄가 가능한 정도의 적은 에너지만 폭굉시 배출하고 히브 에너지는 되도록 배출하는 폭약을 선정하여야 한다. 이 때 중요한 사항은 언제 얼마나 많은 후폭굉 에너지가 손실되지 않고 나타나는가 이다.

**파쇄에 미치는 폭속의 영향**

에멀전 폭약의 경우 에멀전 입자 크기에 따라 폭속이 크게 영향을 받는다. 예를 들면 입자가 작으면 화약은 이상적 특성을 가지며 입자가 큰 경우에는 비이상적 화약 특성을 가진다. 파쇄 에너지 (fragmentation energy)와 폭속과의 관계를 Fig. 10

에 나타내었다.<sup>2)</sup> 고 충격압 P4의 경우 고파쇄에너지를 배출한다.

Kristiansen(1990) 는 평균 파쇄 크기와 폭약과 암석의 임피던스 비를 다음과 같이 비교하였다.<sup>14)</sup>

$$I = \rho V \tag{4}$$

여기서,  $\rho$  = 폭약 혹은 암석의 밀도,  $V$  = 폭속 혹은 암석 음파속도

평균 파쇄크기가 파쇄에너지에 Fig. 11에 나타난 것처럼 역비례한다. 계산된 파쇄에너지로부터 유도된 평균파쇄크기와 측정평균파쇄크기의 일치는 임피던스 비를 비교해보면 된다. 비이상 폭약은 저가스 볼륨 폭약 즉 논리적으로 비이상 폭약이고 화학성분들이 충격과 파쇄 단계 동안 가스반응물로 변환되지 않는 폭약이며 역으로 이상폭약은 고가스 볼륨 폭약이라고 할 수 있다. 균일한 암의 파쇄를 위해서 폭약/암석의 임피던스비는 0.5보다 커야 한다.

**Heave에 대한 폭속의 영향**

석회석 광산에서 안포는 나쁜 파쇄도를 나타내지만 히브는 에멀전계열폭약보다 좋은 결과를 나타낸다. 두 폭약의 전체에너지는 유사하나 충격과 파쇄 단계동안 전달되지 않았던 에너지가 보존되다가 히브로 나타난 것이다.

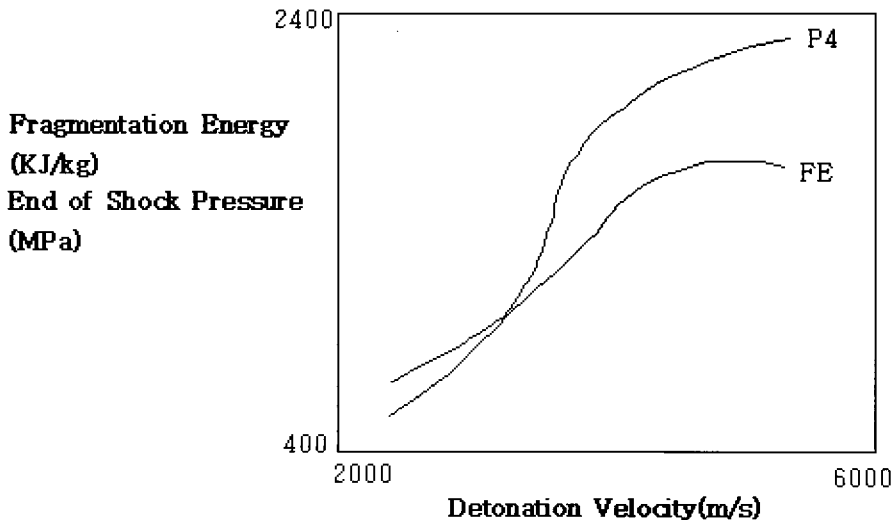


Fig. 10. Fragmentation energy vs detonation velocity.

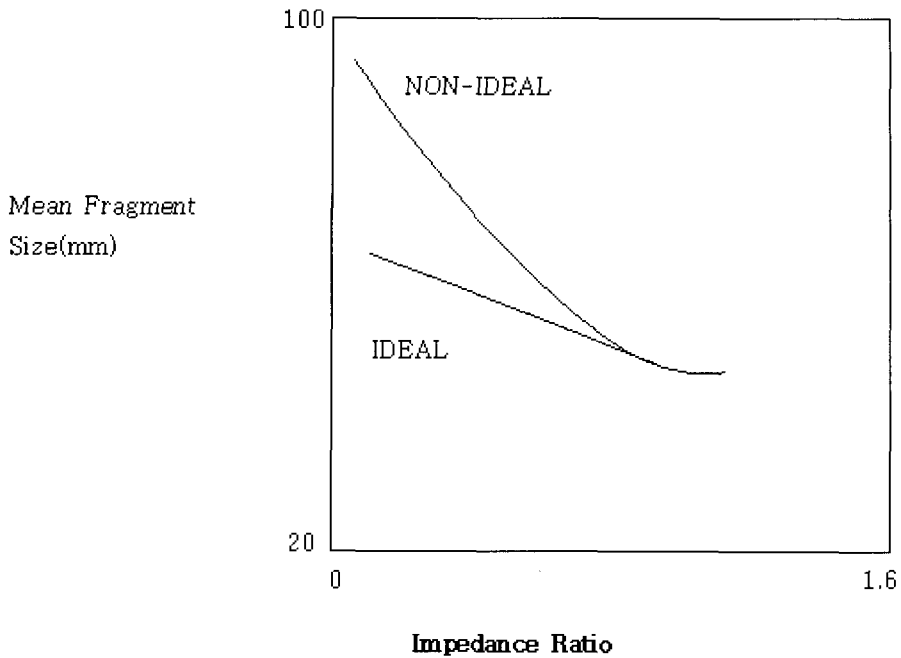


Fig. 11. Mean fragment size.

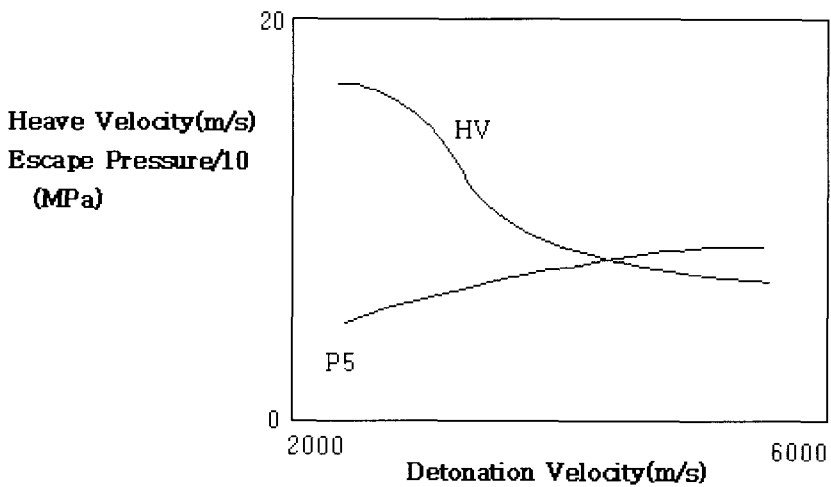


Fig. 12. Heave velocity vs VOD.

Fig. 12 를 보면 히브속도는 폭속 3500이하에서 급히 증가한다.<sup>3)</sup> 적당한 히브는 고퍽속폭약으로 얻어질 수 있으나 저폭속, 비이상폭약은 최고의 히브 성능을 나타낸다. 동일한 파우더팩터(powder factor)에서 히브 성능의 순위는 Table 7과 같다.

저폭속 폭약이 발파에서 히브능력이 좋을지라도 낮게 측정된 VOD는 후폭굉 반응의 완료 혹은 존재에 대한 증거를 주지 않으며 좋은 히브능력을 가진 것으로 해석하거나 비효율적인 반응을 하는 것으로 해석해서는 안된다.

Table 7. Heave performance ranking

Heave performance	Fig. 10 type
Excellent : 저폭속, 비이상화약	D
Good : 저폭속, 이상(즉 저비중)화약 중폭속, 비이상화약	A C
Adequate : 고폭속, 고충격에너지 고폭속, 이상화약	B A
Poor : waste 에너지를 가진 저폭속	E

Table 8. VOD sensitivity

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

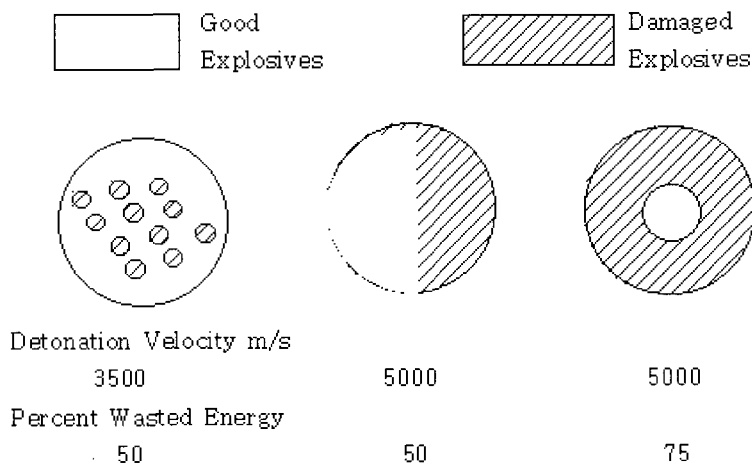


Fig. 13. Special cases of damaged explosives.

#### 4.4 품질

폭속은 폭약의 밀도와 반응성 변화에 민감하다 (Table 8 참조)<sup>2)</sup>

VOD 10% 변화는 밀도 혹은 폭굉 에너지의 20% 변화를 나타낸다. 이 변화가 후폭굉 반응에서 발파성능에 직접 연관은 없고 단지 화학변화를 나타낸다. ANFO를 제외한 노화화약(경시품)이나 수공에서는 이러한 변화는 일반적이다. 그러나 폭속은 폭약의 일관성(consistency)이나 품질을 평가하는데 유용한 도구이다.

또한 50% 손상된 폭약의 특성에 대하여 Fig. 13과 같이 비교해 보았다. 손상은 동일할지라도 화

약 성능은 판이하게 다르므로 폭약 품질에 따른 화약 특성을 정확히 파악 후 발파에 적용하여야 한다.

#### 5. 결론

폭속에 영향을 미치는 요인을 정리하면 다음과 같다.

- 1) 화약 조성 및 특성
- 2) 화약 장전경
- 3) 약 장전 밀도
- 4) 온도
- 5) 프라이밍(priming)

또한 폭속이 발파에 미치는 영향을 다음과 같이 정리하였다.

- 1) 폭속과 폭약 품질 및 발파 효율성과는 직접적인 관계가 있는 것은 아니다.
- 2) 현장 발파공에서의 폭속 측정은 유용한 품질 모니터링 도구이다.
- 3) 저폭속은 반드시 아니지만 비이상 폭약을 나타낸다. 저폭속 특히 비이상 폭약은 히브용에 적합하다.
- 4) 프라이밍의 주 목적은 폭굉의 신뢰성이며 프라이머 부근의 폭속을 측정하여 런업과 런다운 폭속 및 기간에 대한 적절성을 평가하여야 한다.
- 5) 비이상 폭약은 폭굉 반응 후에 상당한 양의 에너지를 방출한다.
- 6) 측정된 VOD는 후폭굉 반응이 충격, 파쇄, 히브 혹은 손상된 화약 부분인지를 나타내지 않는다.
- 7) 고폭속 제품은 고충격에너지를 보증하며 또한 중 혹은 경암에서 좋은 파쇄를 보증한다. 단 터널발파는 제외.
- 8) 파쇄 효과를 내기 위하여 가장 중요한 점은 화약과 암의 임피디스비를 0.5 이상으로 유지하여야 한다.

## 참고문헌

1. (주) 한화, 2005, 화약과 기술의 신개념 메가팩스 제품설명서.
2. Lownds, C. M., 1992, The Relevancy of Detonation in Blasting, The Second Annual Bulk Mining Explosives South Africa Surface Mining Seminar, pp. 6-11.
3. Udy, L. L. and C. M. Lownds, 1990, The Partition of Energy in Blasting with Non-ideal Explosives, Third International Symposium on Rock Fragmentation by Blasting, pp. 37.
4. Harries, 1983, The Modelling of Long Cylindrical Charges of Explosives, pp. 419.
5. Austin powder, 2000, Emulex 제품설명서.
6. Leiper, G. A., 1987, Describing Explosives in Blast Models, Second International Symposium on Rock Fragmentation by Blasting, pp. 462.
7. Tidman, P. J. and J. R. T. Grant, 1987, An Experimental Study of Explosively Induced Stresses Close to The Borehole Wall, Second international Symposium on Rock Fragmentation by Blasting, pp. 61.
8. McHugh, S. L., 1983, Computational Simulations of Dynamically Induced Fracture and Fragmentation, First International Symposium on Rock Fragmentation by Blasting, pp. 407.
9. Winzer, S. R., D. A. Anderson and A. P. Ritter, 1983, Rock Fragmentation by Explosives, pp. 225.
10. Bergman, O. R., 1983, Effect of Explosive Properties Rock Type and Delays on Fragmentation in Large Model Blasts, pp. 301.
11. Chiapetta, F. R. and D. G. Borg, 1993, Increasing Productivity through Field Control and High Speed Photography, pp. 71.
12. Cameron, A. and P. Grouhel, 1990, The Effect of the Quality of Bulk Commercial Explosives on Blast Performance, Third International Symposium on Rock Fragmentation by Blasting, pp. 335.
13. (주) 한화, 2000, 함수폭약 장기저장성능 보고서.
14. Kristiansen, J., K. Kure, Vestre and J. Bergqvist, 1990, An Investigation of Heave and Fragmentation Related to Explosives Properties, pp. 83.



이 승 안  
(주)한화 인천공장 개발팀장

---