

[論 文]

플라즈마 장비의 발파공법

On the Rock Fragmentation with Plasma Blasting

李慶雲*
Rhee, Kyung Woon

ABSTRACT : Rock fragmentation with plasma blasting technique has advantageous properties in contrast to the conventional blasting method controlling of flying rocks and ground vibrations, when residents are complaining or surrounding structures stay in protection from blasting operations.

The experiences show in urban construction works that the plasma blasting is the most possible method to prevent damages and minimize adverse environmental impacts. The fragmentation energy level is evaluated by numerical simulation using PFC for various drill hole patterns and tested accordingly to get the feasibility. The energy output of plasma blasting system has been improved to a level of 1 MJ, which can break a 2-3 m' granite boulder or 1.5m height bench face. Measurements are carried out to get the ground vibration level and propagation equation, so that control of the blasting operations can be performed more precisely and safely.

제 1 장 서론	제 3 장 플라즈마 암파쇄의 시공을 위한 설계
제 2 장 암파쇄효율의 영향요소	제 1 절 단일공발파
제 1 절 발파이론과 장약량 계산	제 3 절 지질적 불연속면의 영향
제 2 절 발파계수	제 4 절 계단발파 설계
제 3 절 발파설계	제 5 절 심발공의 설계
제 4 절 플라즈마 장치의 발파에너지	제 6 절 기타의 굴착 설계
	제 7 절 플라즈마 시공설계

* 韓國資源研究所 所長

제 1장 서론

국가의 장기적인 성장을 위한 우리의 현실에서 다양한 사회간접자본의 건설은 필수적으로 인구의 집중도가 높은 도시지역은 물론이고 농어촌에 이르기까지 이들 건설사업으로 인한 진동과 소음의 발생은 공해 발생원인이 되고 있다. 특히 암석의 굴착작업이 인근 주민에게 끼치는 문제는 구조물의 피해에 국한되지 않고 인체에도 영향을 주기 때문에 작업현장에서의 민원이 증가되고 있는 실정이다.

플라즈마에 의한 암석의 파쇄기술은 종래의 화약발파로 비롯되는 소음, 진동 및 암석 비산을 최소화하는 암석의 새로운 파쇄방법으로 현장시험을 통하여 그 활용성이 입증되었고, 1차년도에 이어 파괴특성을 규명하고 있다. 천공내에 전해액을 넣고 전기에너지를 가함으로써 고온 고압의 플라즈마가 순간적으로 발생하여 이로 인한 충격파가 주변으로 전달하면서 암석의 파괴강도를 초과하여 균열을 발생시켜 과도한 분진이나 파편의 발생없이 암석을 파쇄할 수 있는 플라즈마 파압에너지는 그 크기를 젤라친 다이아마이트의 42 gram에 해당하는 파쇄능력을 갖는 것으로 시작하여 현재 210 gram에 해당하는 크기로 발전되었다. 2차년도 연구에서는 파압효율에 영향을 주는 변수 및 발파력의 분석, 작업특성과 평가, 시공을 위한 설계, 파압효과의 예측을 위한 모델링 및 진동과 소음측정을 통한 환경적 영향평가를 통하여 암석파쇄에 응용할 플라즈마 발파기술을 확립하는 것을 목표로 하였다.

암반굴착기술은 지하공간 개발은 물론 광산, 토목, 건축등 다방면에서의 기본요소이다. 그러나 이때에 발생하는 환경공해적 요소인 굴착작업시의 소음, 진동, 암석의 비산, 먼지등을 제어하기 위하여 조절발파와 같은 간접방법과 폭약을 사용하지 않고 암석에 균열을 발생시켜 분리시키는 방법등이 활용되고 있으나, 근본적인 발생원의 차단과 시공성에서 볼 때 더 나은 방법이 요구되고 있다.

플라즈마에 의한 암석의 파쇄기술은 파쇄에너지의 조절로서 진동원의 크기를 작업환경

에 적절한 수준으로 조절할 수 있으며, 특성적으로 플라즈마 발생충격파에 의한 암석 균열이 파쇄의 주된 역할을 가지게 됨으로서 화약발파에 부수되는 환경문제에 비해 큰 이점을 갖게 된다. 또한 기존의 암반굴착 작업은 주기적인 작업공정의 성격상 소비시간이 많아 원가에 미치는 부분이 높다.

본 연구에서 목표로 하는 플라즈마에 의한 굴착 방법은 암석의 비산, 먼지 및 폭연의 발생이 없으므로 인해 작업현장에서 떠나지 않고 연속적인 작업을 할 수 있어 생산성을 높여 경제·산업적 측면에서 볼 때 매우 유리하다고 일 수 있다. 또한 굴착작업은 점차 기피업종으로 되어 전문인력의 확보가 어려워지고 있어 폭약을 사용하지 않는 굴착작업이 가능하다면 전기적 작동에 의해 이루어지는 플라즈마 암파쇄 방법은 작업 자동화를 성립시킬 수 있는 가능성이 높아 이 기술이 갖는 의미는 크다고 본다.

그러나 기존의 화약발파에 의한 굴착기술이 오랜 기간동안 발전 정립되어온데 비하여, 플라즈마에 의한 암석굴착은 개발 초기이며 더욱이 플라즈마 파쇄시스템은 현재로서는 단일공 및 2~3공에 대한 파쇄 시스템인 한계성으로 인하여 이를 극복하기 위한 기본적인 연구가 필요하다.

특히 여러 형태의 굴착방식 즉 터널굴착, 연속작업에 의한 굴착, 다단식 파쇄에 대한 연구가 필요하다. 더 나아가 플라즈마 발파장치의 구성에 있어 천공-장약-발파-폐석처리의 작업이 일관성을 갖게 하는 장비로 구축하기 위하여서는 새로운 개념으로 발전시켜야 하는 문제점이 있다.

제 2장 암파쇄효율의 영향요소

플라즈마에 의하여 암석이나 암반을 파쇄하는데 영향을 미치는 요소는 여러 가지가 있는데 화약발파와 마찬가지로 설명될 수 있다. 이러한 영향요소를 이해하지 못한 경우에 불안정하거나 비경제적인 발파가 일어나 발파효

를 얻지 못한다.

발파효과에 영향을 주는 많은 요소들은 조정 가능한 변수와 조정 불가능한 변수로 분류할 수 있는데 제1보의 표 2-1과 같다. 조정이 가능한 변수들은 발파설계의 각요소가 되며, 불가능한 변수는 발파설계에 고려되는 입력자료로 활용된다. 후자에는 지질조건, 암석의 강도 및 역학적 특성, 암반의 구조적 특성 등으로 대체로 자연적 요소들이다. 날씨가 수리적 조건은 어느 정도까지는 조정이 가능한 자연조건이다. 조정이 가능하여 발파설계에 언급될 요소는 천공의 직경, 깊이, 경사를 비롯하여 전색의 깊이 및 재료, 최소저항선의 길이, 발파공의 배치, 기폭방법, 기폭순서, 자유면의 수, 폭약의 종류, 장약방법 및 형태 등이다.

이상의 여러 요인들은 상호간에 영향을 미치고 궁극에는 발파효과를 좌우한다. 이들이 발파에 어떠한 영향을 미치며 발파설계에 어떻게 적용되는가를 본장에서 언급하고자 한다. 그리고 플라즈마 파압장치의 이론적 발파력을 화학적 평형방정식으로부터 유도하고 일반 폭약의 능력과 비교분석하였으며, 현장에서 비교실험한 자료를 분석하였다.

제 1절 발파이론과 장약량계산

발파이론은 폭약의 특성이나 암석의 파괴 메카니즘 암반내 균열발생 등을 정의하고 발파효과를 총체적으로 규명하는 것이다. 발파이론은 여러 측면에서 설명되고 발달되어 왔는데 주요한 이론들이 제1보에서 많이 언급되어 여기에서는 발파이론 중에서 발파설계 요인들이 수식화될 수 있는 장약량 산출에 관한 것을 언급하고자 한다.

균질한 암반에 적당량의 폭약을 측정된 깊이로 장전하여 발파하면 원뿔 모양의 파쇄공이 생기는데 이것을 漏斗孔이라고 한다(제1보 그림 2-7). 단일 발파에 누두공을 형성하기 위한 장약량 L은

$$\text{표준발파에서 } L = C V$$

누두지수의 함수와 각 계수를 고려하면,

$$L = f(n)gedW^3$$

여기서 C는 발파계구로서 f(n)는 누두 형태에 따른 보정계수, g는 암석의 저항성을 나타내는 암석계수, e는 폭약의 효력을 나타내는 계수, a는 전색에 의한 밀폐성을 나타내는 계수 등으로 정의되며, V는 누두공의 부피로서 표준발파에서는 최소저항선인 W의 삼승과 같다.

발파작업은 각각의 발파효과를 얻은 최소저항선의 크기와 장약량을 결정하여 수행되어야 한다.

플라즈마 파압에서도 시험발파를 수행하여 최적의 최소저항선을 결정하고 장약량을 산출하여야 한다. 장약량은 사용하는 전력이나 알루미늄의 양으로 대체될수 있으며 이는 경제적이며 효과적인 발파를 뜻한다. 플라즈마 파안은 장비의 한계 때문에 폭약발파에 비하여 발파력이 작으므로 기존의 발파에너지를 일정하게 결정하고 발파계수에 따라서 최소저항선을 조절하는 방법도 추천될 수 있다. 즉 일정한 양의 에너지를 갖는 장치로부터 파압을 유도하는 최소저항선의 최대값을 시험발파를 통하여 결정하고 안전률을 고려하여 파압작업을 연속적으로 수행하여야 할 것이다.

제 2 절 발파계수

2.2.1 폭약계수

폭약계수는 특정의 폭약을 기준으로하여 다른 폭약과의 발파효력을 비교하는 계수로서, 강력한 폭약일수록 계수의 크기는 작아 적은 량의 폭약이 산출된다. 발파효과를 나타내는 비에너지, 폭발압력, 맹도 등이 있는데 따라서 계수의 크기가 달라진다. (표 2-1) 이때 기준 폭약은 표에서와 같이 니트로 글리세린 60%의 Strength Dynamic이다.

2.2.2 암석계수

암석계수는 발파에 대한 암석의 저항력을 나타내는 계수로서, 강한 암석일수록 이 값의 크기는 크며 많은 양의 장약을 필요로 한다. 암석계수는 앞의 폭약계수와는 달리 단위를 갖지만 적용에서는 상대적인 값으로 해석될 수 있다. 이 값은 니트로글리세린 60%에 해당하는 다이ना마이트를 깊이 1m에 장약하여 완전전색 했을 때 표준발파를 일으키는 장약량으로 얻어진다. (표 2-2)

표 2-1 폭약종류에 따른 폭약계수

폭약의 종류	폭약계수의 크기	
	매도	일량
NG 93%Strength Dynamite	0.5	0.6
NG 75%Strength Dynamite	0.8	0.8-0.9
NG 60%Strength Dynamite	1(기준)	1(기준)
NG 50%Strength Dynamite	1.2	1.1 - 1.2
NG 40%Strength Dynamite	1.4	1.2 - 1.3
NG 35%Strength Dynamite	1.5	1.3 - 1.4
NG 30%Strength Dynamite	1.6	1.4 - 1.5
카 리 트	1.5 - 1.7	0.8 - 0.9
탄광용 질산암모늄 폭약	3.0 - 4.0	1.2 - 1.4
질산암모늄 다이ना마이트	4.0 - 5.0	1.3 - 1.5

2.2.3 전색계수

전색계수는 장약 후 점토로 발파공 상부를 메워 공을 완전 밀폐시킨 상태를 1로 하여, 불완전한 밀폐상태에서는 1보다 큰 값이 되어 표준발파가 되기 위해서는 많은 양의 폭약을 사용한다. 이의 크기를 정확히 표현하기는 어려우나 다음 표 2-3과 같은 기준으로부터 산출한다.

표 2-2 암석종류에 따른 암석계수

암석의 종류	암석계수의 평균크기(kg/m ³)
경규암	3.26
규 암	2.68
화강암	2.09
섬록암	2.08
편마암	2.07
조면암	2.02
안산암	1.80
셰 일	1.66
석회암	1.62
사 암	1.44
편 암	1.30
응회암	12.8

표 2-3 전색계수의 기준치

전색상태		전색계수의 크기	
적당히 깊은 장약공	완전전색	1.0	
	불완전 전색	1.0-1.25	
	전색하지 않음	1.25	
장약만이 장약실에 있을 경우	장약실 위에 성토	1.5	
	성토하지 않음	2.0	
외부 장약	일반적 경우	2.0-2.45	
	특별한 경우	9.0	

제 3절 발파설계

2.3.1 발파공의 직경

발파공의 직경은 사용하는 천공장비의 규격과 파쇄하고자 하는 암반의 크기, 인근 지상구조물과의 거리를 고려하여 결정되어야 한다. 이들이 허용하는 범위 내에서 발파효

과를 얻을 수 있다면 천공장은 클 수록 공수가 줄어들어 경제적이다.

천공경의 최대치는 천공장에 따라 좌우된다. 다시 표현하면 최소천공장(L)은 천공경(d)에 의해 결정되는데 다음과 같다.

$$L = 24 \cdot d$$

인근 지상구조물의 거리는 발파진동 때문에 발파설계의 또 다른 요인이다. 진동의 크기를 감소시키기 위해서는 장약량을 줄여야 하는데 지발발파를 사용하거나, 파쇄량을 줄이거나, 천공공을 줄여야 하는 방법이 있다. 이들 방법을 독립적으로 적용해도 되지만 일반적으로 상호 관련하여 조절한다.

2.3.2. 최소저항선

여러 공을 동시에 발파는 제발발파에서 공의 직경과 길이가 결정되면 공간의 간격이 결정되어야 한다. 공간의 간격은 공간격(Spacing)과 최소저항선(Burden)으로 구분되는데 일반적으로 그림 2-1 에서와 같이 자유면에 수직한 공간거리를 최소저항선이라 한다.

계단식발파에서 지발설계는 그림 2-2와 같이 두가지 형태를 갖는다. 자발순서가 자유면에서 차례로 이루어지는 a 경우에 천공간격은 발파의 최소저항선과 같으나 그렇지 못한 b 경우에는 천공간격과 최소저항선은 같지 않다. 설계에서는 발파의 최소저항선(True burden)을 뜻하며, 천공간격은 배열에 따라 다시 결정되어야 한다. 그러므로 설계에서는 지발방법이 그림과 같은 배열형상을 우선 결정하여야 한다.

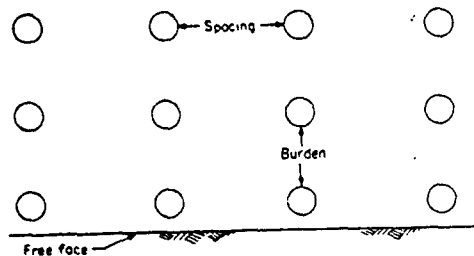
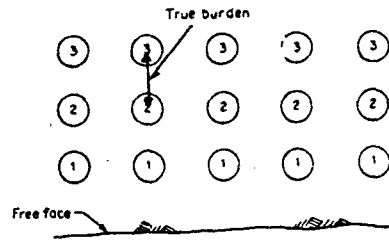
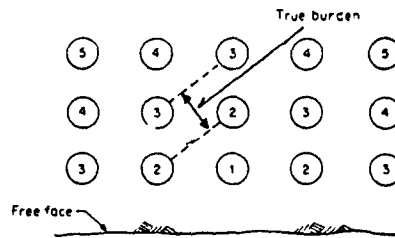


그림 2-1 Spacing and burden in drilling



(a)



(b)

그림 2-2 Burden in drilling and in blasting

그림 2-2에서 a의 경우 실제 발파저항선은 천공저항선의 크기와 같으나, b의 경우에는 다르다. 천공간격이 2m와 3m일 때 발파저항선(True burden)은 1.66m가 된다.

천공경과 천공장으로부터 발파의 최소저항선을 구하는 방법에는 Andersen식과 Langefors 식이 있는데, 후자가 보다 복잡하며 가장 많이 활용되는 경험식이다.

Andersen 식은 $B = \sqrt{dL}$ 과 같이 간단하다. 여기서 단위는 foot와 inch를 사용한다. 미터단위로 환산하면

$$B = \sqrt{dL}/3.46 \text{ 이 된다.}$$

Langefors는 천공경(d,mm)과 전색도(P, kg/m³), 폭약의 상대강도(s, 1.3 for gelatine), 암석상수(c, 일반적으로 0.45), 고착도(f, degree of fraction, 일반적으로 1), S-B의 비(일반으로 1.25) 등의 요소들을 사용하여

$$B = (d/33) * \sqrt{\frac{Ps}{cf(S/B)}}$$

와 같은 수식을 제안하였다. 최근에는 Konya의 수식이 활용되고 있는데 암석의 비중(Dr)과 폭약의 비중(De)으로부터 다음과 같이 결정한다.

$$B = 37.8d * \sqrt{\frac{De}{Dr}}$$

여기서 d는 폭약의 직경이다.

2.3.3 천공간격

천공간격은 최소저항선이 결정된 다음 얻어져야 하는데 제발발파일 때 단열에서는 저항선의 1.8배이며, 다열에서는 다음 식으로부터 얻는다.

$$S = \sqrt{BL} \text{ (where } B < 1/4 L \text{)}$$

이때 천공장이 커 L/B 값이 4 이상일 경우에는 S = 2B로부터 천공간격을 결정한다. Langerfors는 앞식에서 S/B의 크기를 1.25로 하여 천공간격은 최소저항선의 1.25배이다.

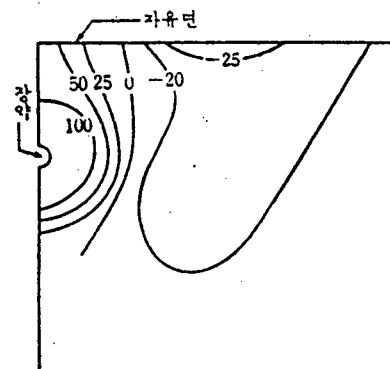
2.3.4 자유면

폭발에너지가 암반에 미치는 에너지는 발파점으로부터 거리에 따라 줄어든다. 그러나 자유면에서 저항이 없는 등의 이유로 폭발에너지가 야기하는 암반응력은 그림 2-3에서 보듯이 다른 면보다 크기 때문에 일정거리 내의 자유면에서는 암반파쇄가 잘 일어난다. 그러므로 발파효과는 자유면의 수에 따라 증가하는데 표 2-4에서 크기를 알 수 있다. 자유면의 수가 4개일 때 장약량 발파계수 C(4)

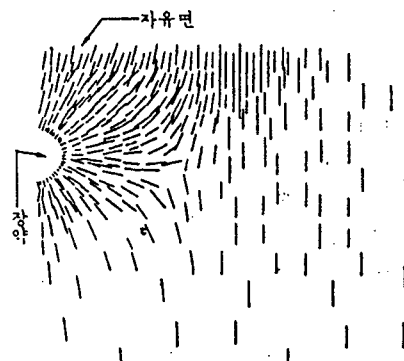
는 한 개일 때의 C(1)에 비하여 0.29배 또는 0.5배이다. 다시 표현하면 발파효과는 2-3.4배이다.

표 2-4 자유면의 수와 발파계수의 보정

자유면수	인장파괴설에 의한 이론치(二次元)	실측치(三次元)
1	C(1)	C(1)
2	C(2) = C(1)	C(2) = C(1)
3	C(3) = 0.58 C(1)	C(3) = 0.66 C(1)
4	C(4) = 0.29 C(1)	C(4) = 0.5 C(1)
5		C(5) = 0.4 C(1)
6		C(6) = 0.25 C(1)



(a) 응력분포 등곡선



(b) 파괴 및 균열대의 방향

그림 2-4 Stress analysis in blasting

제 4 절 프라즈마 장치의 발파에너지

도심에서 환경적 측면을 고려하여 진동과 소음, 비산을 줄일 수 있는 암반파쇄방법으로 플라즈마 파암법을 개발하면서 많은 발전을 이루었는데 파쇄에너지의 증대가 주목된다.

수산중공업 플라즈마 사업팀이 북아현동 아파트 건설현장에서 성능 비교시험에서 사용한

에멀라이트 (Emulite, 고려화약제품)는 Emusion 폭약의 상품명이며, 이론적 폭약강도는 표 2-5에서 알 수 있듯이 ANFO의 80%, 제라친 다이아마이트의 70% 수준이다. 현장 시험에서 파암능력을 비교시험한 결과 에멀라이트 335(330 - 340)gr의 폭약능력과 같은 위력을 갖는 것으로 나타났다.

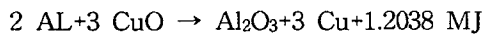
표 2-5 Properties of the selected explosives and the plasma system

Explosive	Density (gr/cm ³)	VOD (km/sec)	Energy (MJ/kg)	Relative Strength (ANFO=1)		
				by weight (RWS)	by Langefors Equation	
미 국	ANFO	0.81	4.0	3.91	1.00	1.00
	Gelatin Dynamite	1.43	6.0	4.27	1.16	1.00
	Slurry(Iresesis)	1.30	4.7	3.22	0.87	0.82
Sweden Emulite (100)		1.20	5.6	2.90	0.78	0.81
한 국 화 약	GD HiMite 6000	1.5	6.0	5.14	1.31	1.25
	GD HiMite 5000	1.3	5.3	4.85	1.24	1.19
	New Mite 4000	1.1	4.5	3.45	0.88	0.87
	FINEX 1	1.0	4.4	3.09	0.79	0.77
Plasma System with 30 gr Al		1.36	10.0	0.95MJ	0.243	0.205

표 2-6 Equivalent weights of explosives for a plasma system (unit : gr)

Explosive	Theoretical in RWS	in Langefors Equation	in site test	Final Value	
미 국	ANFO	243	205	261 ~ 271	230
	Gelatin Dynamite	209 ~ 222	205	224 ~ 271	210
	Slurry (Ireseis)	279 ~ 295	250	330 ~ 331	280
Sweden Emulite (100)		312	253	330 ~ 340	310
한 국 화 약	GD HiMite 6000	185	164	199 ~ 217	180
	GD HiMite 5000	196	172	210 ~ 228	200
	NewMite 4000	276	236	296 ~ 312	280
	FINEX I	308	266	331 ~ 352	310

이러한 폭발력의 증대는 화학적 에너지로부터 발생하였다. 플라즈마 파압의 초기에는 전해질을 알루미늄 가루와 물로 사용하여 화학적 에너지를 극대화 시키지 못하였으나, 사업팀은 전해질인 알루미늄 가루를 산화시키는 산화제를 산화등으로 개발하여 커다란 화학적 에너지를 얻을 수 있었다. 이들의 화학적 평형방정식은 다음과 같다.



윗식에서 알루미늄의 산소부족량은 0.89 gr/gr이며, 총발열량은 1.2 MJ이다.

(알루미늄 1 몰 = 26.98 gr, 1.2038 MJ/53.96 gr = 0.0223 MJ/gr)

이러한 반응은 8 KV 이상의 전압이 수 milli-second 내에서 방전될 때 폭발적으로 일어나 원하는 폭발력을 갖게 된다. 현재 수산 중공업 플라즈마 사업팀이 갖고 있는 플라즈마 발생장치의 능력인 280 KJ의 전기에너지(그림 3-5(b) 참고, 전압과 전류곡선으로부터 적산하여 산출한 값)로 산화시킬 수 있는 알루미늄의 양은 약 30gr으로 한 개의 장치가 갖는 이론적인 화학적 폭발력은 0.67 MJ이다. 여기에 전기에너지를 합하면 0.95 MJ이 되는데 이크기가 플라즈마 한 시스템이 가지는 발파 에너지라 할 수 있다.

표 2-5에서 RWS는 상대적 폭발력으로서 보통 ANFO를 기준으로 한 크기이다. 즉 화학적 폭발에너지 3.91 MJ/kg에 대한 비로서 젤라친 다이ना마이트는 폭발에너지가 ANFO보다 16% 크다.(4.27/3.91 = 1.09 이나 폭약제조회사 마다 약간 다른 혼합비 때문에 1.16과 오차가 있다.) 알루미늄 30gr을 사용한 플라즈마 장치에 의한 0.95 MJ의 에너지는 ANFO 243 gr의 위력과 같으며, 제라친 다이나마이트 209-222 gr, 또는 에멀라이트 312-328 gr의 이론적 폭발에너지에 해당된다. 이러한 이론적 산출량은 비록 알루미늄의 사용량이 30 gr 이상 사용한 경우라도, 북아현동의 중경암 화강암 지역에서 얻은 실험결과인 에멀라이트 폭약량 335 gr과 잘 일치하고 있다.

한편 Langefors은 암석을 파쇄하는 능력을 수치화하는 발파력(s)은 화학적발파에너지(e) 뿐 만 아니라 화학식에서 얻을 수 있는 가스의 발생량(v)에도 영향을 받기 때문에 다음과 같은 경험식을 주장하고 있다.

$$S = 5/6 e + 1/6 V^2$$

여기서 S는 폭약강도로서 e와 v의 단위가 MJ/kg 및 1/kg으로 서로 달라 단위를 가질 수 없으나, MJ/kg의 단위로 해석될 수 있다. 그러나 이는 보통 ANFO = 1로 하는 상대강도로 많이 표현된다. 대부분의 폭약은 가스 발생량이 ANFO 보다 작아 이 값은 표 2-5에서 보는 바와 같이 RWS보다 작아진다.

Plasma의 화학방정식에서 Al 2 mol에서 1atm의 발생량은 산화알루미늄 1 mol(22.4 l)이다. 따라서 Al 30 gr에 의한 가스량은 $22.4 \text{ l} \times 30/53.98 = 12.45 \text{ l}$ 이다. ANFO의 가스발생량이 972 l/kg이므로 상대적 V는 $12.45/972$ 이다. 따라서 플라즈마 장치에서는 가스량이 현저히 작아 Langefors에 의한 ANFO에 대한 상대적 발파력은 $S = 5/6 \times 0.243 + 1/6 \times 0.01286 = 0.205$ 으로 크게 줄어든다. 이러한 크기는 ANFO 205 gr, 제라친 다이나마이트 205 gr, 또는 에멀라이트 253 gr의 이론적 폭발력에 해당된다.

이상으로 연구의 플라즈마 시스템의 이론적 폭발강도는 ANFO의 200-240 gr, 또는 에멀라이트 250-330 gr에 해당되는 것으로 결론지을 수 있다. 많은 실험에 의한 자료는 아니지만 북아현동에서 에멀라이트와의 발파력 현장비교시험에서 얻어진 파쇄력은 ANFO 270 gr, 젤라친 다이나마이트 240 gr의 능력을 갖는다. (표 2-6 참고)

따라서 제 1보에서는 제라친 다이나마이트로 대표되는 일반 폭약의 42 gr(±10 gr)의 발파 및 파쇄능력이라 결론지었는데, 지금은 에멀라이트 250-330 gr 정도로 발전되었다. 이상을 종합하면 결론적으로 2년동안의 연구개발에 의하여 폭력은 젤라친 다이나마이트 42 gr의 능력에서 210 gr으로 증폭되었다고

할 수 있다.

전기에너지 0.28 MJ로써 물에 희석한 전해질의 적정량은 알루미늄 30 gr(약 1.1 mol)을 포함하여 총 400gr 이다. 이의 비중은 1.36으로 공경 50mm에 장약하면 약 15cm 길이에 걸쳐 설치된다. 한편 플라즈마 반응곡선에서 최대반응속도는 약 10 km/sec이다. 따라서 표 2-5와 같은 특성을 얻을 수 있고, 표 2-6으로 다른 폭약과 비교가 가능하다.

제 3 장 플라즈마 암파쇄의 시공을 위한 설계

제 1 절 단일공 발파

발파공 주변에 자유면의 유무가 암파쇄의 관건이 되는 것은 경험으로 잘 알고 있다. 주변의 자유면이 없다면 플라즈마 에너지가 크다 하더라도 어느 한계 이하에서는 균열을 발생시킬 수 없으며, 한편 같은 에너지로 옥석에서는 쉽게 파쇄된다. 최소저항선을 일정하게 유지하면서 파쇄효과가 변화하는 대상 암석의 형태를 고찰하여보면 그림 3-1과 같이 나타낼 수 있다.

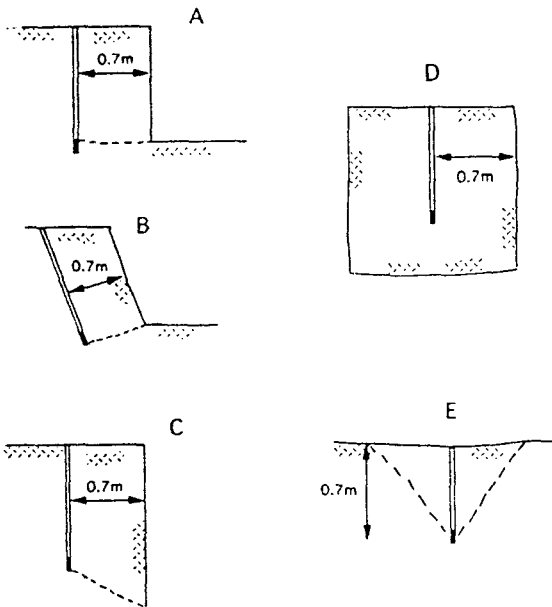


그림 3-1 최소저항선이 0.7m인 경우 자유면과 파괴 양상 비교

그림에서 E의 경우 A에 비하여 파쇄에 필요한 에너지는 2~10배에 달한다.

반면 옥석의 경우 자유면이 모든 방향에서 성립되므로 보통 계단식 파괴에 비하여 25% 수준이면 충분하다. 플라즈마 현장실험에서 누두(crater)를 형성하는 E의 경우는 얻지 못하였는데 그 이유는 현재 7.5 ~ 8 KV의 충전전압 수준으로는 누두를 형성하기에 충분한 에너지가 아니기 때문이다. 반면에 A, B, C의 경우를 비교하면 천공의 경사도에 따라 파괴에 필요한 에너지의 크기가 감소되는 것을 알 수 있다. 실험결과에 의하면 수직거리 1m 당 수평거리로 나타내는 n(m) 값에 대하여 최소저항선 B와의 관계식이 다음과 같이 표현된다. 이에 따라 자유면의 수에 따라서 파괴에 필요한 적정 에너지의 크기는 표 3-1과 같다.

$$B \propto \frac{1}{\sqrt{\frac{3}{3+n}}}$$

표 3-1 자유면 수에 따른 필요 파괴에너지 비교

구분	형식	자유면 수	필요 에너지 비교
A	일반적인 계단형식	2	1
B	경사공 형식	2	0.85
C	바닥면이 없을 경우	2	0.75
D	옥석	6	0.25
E	누두(crater)형 파괴	1	2~10

계단식 파쇄에서 또 한가지 고려되어야 할 사항은 천공 내에 전해액을 장약하는 형태에 대한 점이다. 즉 그림 3-2에서와 같이 장약된 부분의 길이가 길어지면 길어질수록 파쇄가 가능한 최소저항선의 길이가 감소한다.

같은 양의 전해액을 되도록 집중해서 장약하려면, 즉 h의 길이를 짧게 하려면 천공경이

적정한 규격이 되어야 하며 이 점은 폭약에서 그 위력이 장약밀도에 따르는 것과 유사하다고 볼 수 있다. 실제로 전해액을 수용하는 봉의 길이는 전극판의 길이에 따라 정해져 15cm로 일정하게 유지하며 전해액 봉의 길이를 그 이상으로 길게 하면 순간방전을 일으키는 부분은 전극판의 끝부분이기 때문에 임의로 길게 만들 수 없다.

한편 화약발파에서 암석파괴의 효과를 비교하기 위해 소요되는 에너지량을 보기 위한 비장약(specific charge) q 는 다음과 같이 표현되고 있는데, 즉

$$q = \frac{W_t}{V}$$

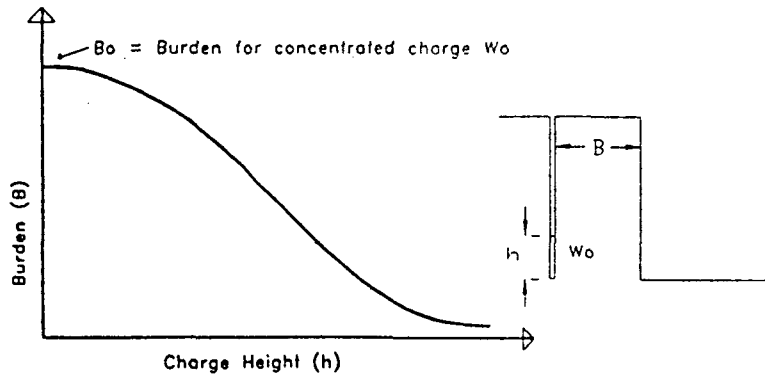


그림 3-2 동일한 량의 전해액일 때 장약형태에 따른 암석 파괴능력

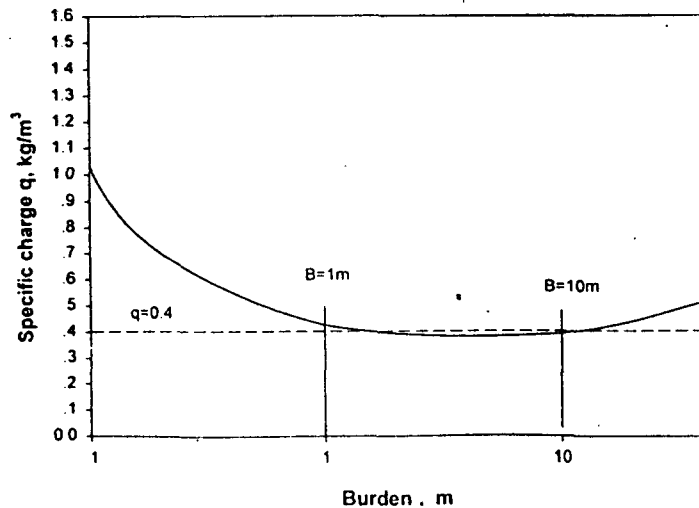


그림 3-3 최소저항선과 비장약량의 관계

여기서 Q 는 비장약(kg/m^3), W_t 는 화약량, V 는 파괴되는 암석의 원부피를 뜻한다.

현장실험에서 구하는 적정한 최소저항선과 비장약량의 관계를 보면 그림 3-3과 같이 표현될 수 있는데 플라즈마의 경우 파압 에너지와 최소저항선의 관계가 아직까지 명확하게 파악되지 못하고 있으나 그 동안의 실험을 종합하였을 때 1 MJ의 에너지로 파쇄시킬 수 있는 암석의 부피를 보면 화강암의 경우 최소저항선 0.6m, 천공장 1.5m로 가능한 암석부피는 0.27 m^3 가 되므로 최대값으로 3.7MJ/ m^3 이라는 개념이 적용될 수 있어 앞으로의 효과분석에 기준 될 수 있을 것으로 본다.

제 2 절 연속발파의 효과

$$C_s \approx 3500 \text{ m/sec}$$

$$C_r \approx 2500 \text{ m/sec}$$

일반적으로 2개공 이상을 연속하여 파압하는 경우 관련되는 영향요소는 공간 간격, 연속공의 수, 인접공과의 플라즈마 반응 시간차이다. 화약발파의 경우 공간 간격과 최소저항선이 1 일 때 지발시간이 m당 6 ~ 15 ms의 관계가 성립하며 장약량이 단일공에 비하여 80%로 감소된다. 플라즈마 반응곡선에 따르면 0 ~ 1.5 ms로 시간차를 두어 인접공을 파압할 경우 최소저항선과 공간 간격이 동일한 조건하에 단일공에 비하여 10~15%의 에너지 감소가 가능해지며 컴퓨터 시뮬레이션(제4장)에서 더 상세히 검토하기로 한다.

앞절에서 언급한 장약량의 변화를 통하여 최적값을 얻지만 플라즈마의 경우 최대에너지 수준이 현재의 장비로서는 1MJ로 일정하므로 파쇄압의 부피를 증대시키기 위해서는 공간격과 배치가 중요한 역할을 하게 된다.

공간 간격을 적정화하기 위해서는 충격파 속도도 중요하지만 균열발생에 직접적인 요인인 공벽에서의 압력크기가 시간적 변화에 따라 감소되므로 플라즈마에서와 같이 압파쇄가 주로 충격파에 의한 균열발생만으로 이루어지는 조건하에서는 공벽의 압력감소가 주로 충격파에 의한 균열발생 만으로 이루어지는 조건하에서는 공벽의 압력감소시간으로부터 적정 공간격을 도출하기로 한다.

암석 중에 주어진 응력에 따른 변형률과의 관계는 암석을 통과하는 응력파에 의해 발생하는 입자 진동속도와와의 관계로 표현할 수 있다.

$$\epsilon \equiv \frac{\sigma}{E} \approx \frac{ppv}{C}$$

여기서 ppv는 입자의 진동속도, c는 탄성 능력파의 전파속도 화강암에서 P파, S파, 표면파(Rayleigh wave)의 값은 다음과 같다.

$$C_p \approx 5000 \text{ m/sec}$$

견고한 화강암은 인장능력에 의해 공벽의 압력이 30Mpa, 즉 변형률이 0.1~0.2%인 수준에서 파괴되므로 p파에 의한 입자진동 속도 ppv의 값은 5~10 m/s, S파에 의한 입자진동 속도 ppv의 값은 3.5~7 m/s로 계산된다. 그러나 암석에 약면이 이미 존재한다면 이보다 낮은 수준인 0.5 ~ 1m/s에서도 파괴가 이루어질 수 있어서 공벽의 압력은 1/3 ~ 1/10인 3 ~ 10 Mpa에서도 균열발생이 예상될 수 있다. 화강암에서 25mm직경의 공내에서 의 폭압을 계산한 결과¹⁾를 인용하여 시간에 따라 감소하는 현상으로 재정리하여 보면 그림 3-4와 같다. 이때 공벽에서의 초기압력은 100kbar로 설정한다.

암석의 파쇄는 자유면에서 반사되어 되돌아오는 p파와 S파의 간섭에 의해서 균열이 확장되고 새로이 발생되므로 P파가 반사되어 오는데 소요되는 시간을 고려하여 볼 때 최소저항선이 0.6m일 경우 최소한 0.25 ms의 시간차가 계산될 수 있다. 화약발파에서는 균열발생이 생긴 후 가수압에 의해 암석내부에 응력이 일정수준 유지되는 기간이 고려될 수 있으므로 이 가스압의 지속시간을 고려하여 인접공과의 기폭시간차가 결정되므로 대략 25 ms의 개념이 성립된다. 저항선이 5-8 m가 되는 계단 발파에서 시간차 τ (m sec)는 Gustafsson²⁾의 경험식에 따르면 $\tau = KV$ 로 표현하고 있으며 이때 K는 3-5의 값을 갖는 것으로 예측하고 겨우는 심폐기 발파에서와 같은 25ms보다 더 짧은 시간차가 요구될 것으로 본다. Noranda 있다. 하지만 충격파만 존재하는 플라즈마의 Technology Center³⁾에서 시험한 플라즈마

1) Persson,PA,et al,Rock blasting and explosives engineering. 1994. pp. 239

2) Gustafsson,R,BlastingTechnique(981),pp.75

3) Hamelin, M and kitzinger, F., Hard rock fragmentation with pulsed power,3rd Frag Blast(1991)

발파상태를 그림 3-5a에서와 그림 3-5b에서의 수산(주)의 플라즈마 발파상태를 비교하면 전해액의 화학적 반응시간을 고려하지 않고 입력전류의 방전상태만 볼 때 각각 0.25 ms 및 1.5 ms의 짧은 방전시간을 보여주고 있어 화약과의 차이가 큰 것을 알 수 있다.

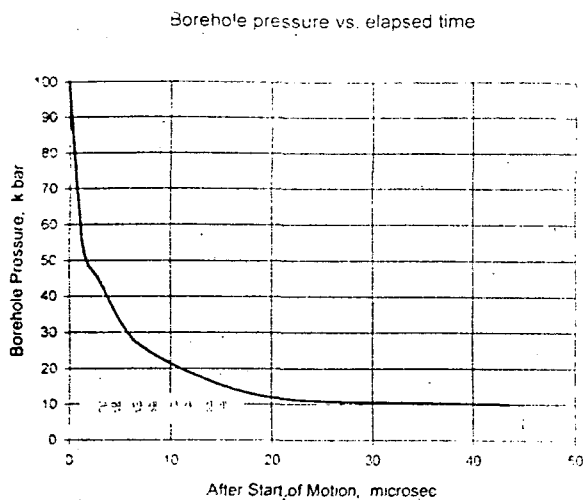
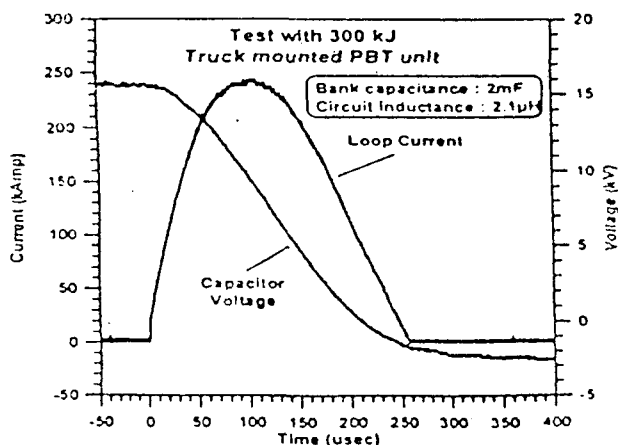
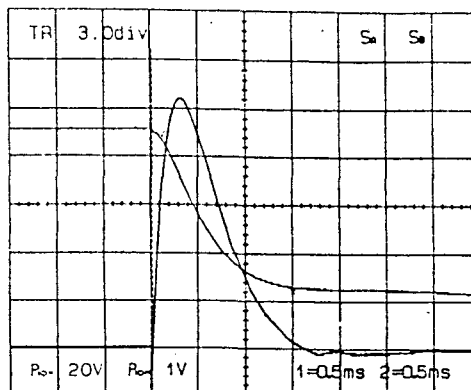


그림 3-4 화강암의 경우 직경 25mm 공내에 발생한 폭압의 시간적 변화



(a)



(b)

그림 3-5 Loop current and capacitor voltage during a typical plasma blasting discharge

제 3 절 지질적 불연속면의 영향

절리, 층리, 단층 등과 같은 약면이 잘 발달된 암석에서는 그 발달 방향에 따라 천공계획을 세워 발파하는 것이 효과적이다. 이 약면이 수평인 경우는 천공 경사를 이 약면과 교차하도록 하여야 파압효과가 좋다. 만일 단층의 경사가 수직에 가깝게 급한 경우에는 최소 저항선이 이 면과 직각이 되도록 방향을 잡아 천공하여야 하지만 그림 3-6에서와 같이 경우에 따라서는 평행하도록 하는 것이 더 좋은 결과를 가져올 수도 있다.

지금까지의 시험결과를 보면 약면이 많이 발달된 암석에서 플라즈마가 발생할 때에 주변의 밀폐성이 좋지 않으면 급격한 압력강화로 균열 발생이 부족한 경우가 많았다. 이문제는 전해액의 양을 증가시키는 것보다는 전압을 높혀줌으로써 해결하는 방향으로 시험이 이루어져야 할 것으로 본다.

그러나 암석의 종류와 풍화도에 따라서 화약발파에서 폭약의 종류를 달리하는 즉 일반적으로 폭발속도가 빠른 폭약은 굳은 암석에

적당하고 반응속도가 느린 폭약은 가스방출이 많아서 균열된 암반이나 절 리가 많은 암반의 발파에 적합(표 3-2 참조)하므로 플라즈마의 경우 좀더 면밀한 검토가 이루어져야 할 것이다. 원칙적으로 보면 플라즈마의 경우 반응속도가 10,000 m/s이므로 발생하는 충격파의 속

도가 높아 굳은 암석에 적절하며 연질의 암석이나 풍화도가 커서 탄성파의 속도가 낮아지는 암석에 대하여는 감소되는 탄성파 전파속도를 감안하여 방전시간 폭과 전해액을 조정하여 반응시간이 길어지도록 하면서 효과적인 파쇄가 되도록 하여야 할 것이다.

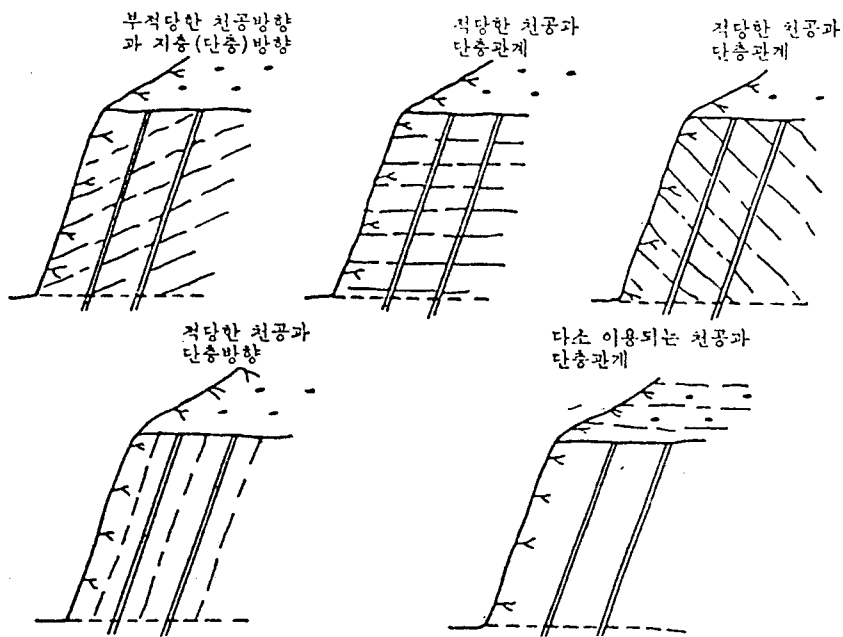


그림 3-6 약면의 발달 방향과 천공방향

표 3-2 폭약과 암석의 상호관계

암석의 종류	충격파의 속도(m/s)	폭굉속도(m/s)	폭약종류
균질한 화강편마암	5,000 ~ 6,000	6,300	다이너마이트
경질 석회암	3,000 ~ 4,500	4,000	초안폭약, 합수폭약
연질 석회암	1,000 ~ 2,500	2,200	ANFO

제 4 절 계단발파 설계

플라즈마에 의한 시공에 있어서 화약발파와의 차이점은 인구조밀지역 혹은 주변의 구축물에 진동영향이 없도록 하여야 하는 저진동, 저소음의 안정성이 강조되는 동시에 가장 시공성이 양호하며 작업조건의 변화에 대처할 수 있는 파암작업이 가능하다는 점이다. 따라서 재래의 계단식발파설계와 큰 차이를 가질 수밖에 없다. 표 3-3은 설계에 관여되는 항목을 보여주며 플라즈마에서 고려하여야 할 항목은 그중에 일부임을 알 수 있다.

천공장의 길이가 길지 않고 전극봉과 전해액의 장약길이가 15-20cm로 한계가 있어 폭

약에서의 선형장약(line charge) 개념이 아닌 집중장약 등의 차이를 가지고 있어 그림 3-7과 같이 설계 할 수 있다.

계단 높이가 천공장과 같거나 길때에 파암효과는 플라즈마 에너지가 1 MJ로 일정한 경우 저항선의 길이가 0.6 ~ 0.7 m 임으로 큰 차이는 없다. 다만 공경이 51mm 이하에서 보다 더 클때가 앞서 설명된 집중장약 개념에 따라 파암효과가 높다고 볼 수 있다. 연속파암의 경우 공간 간격은 저항선 W의 1.0 ~ 1.25배 수준에서 결정할 수 있다. 천공장은 전극봉의 완전한 전색을 위해 1.5m 이상으로 유지하여야 할 것으로 본다.

표 3-3 계단발파설계에서 고려하여야 할 항목

항 목	기호, (단위)	설계상 적용 여부	
		화약발파	플라즈마 파암
Maximum burden	W_{max} (m)	O	O
Practical burden	W_1 (m)	O	X
Faulty drilling - heave factor	F	O	X
Practical hole spacing	E_1 (m)	O	O
Under-drilling	U (m)	O	X
Hole depth	H (m)	O	O
Bench height	K (m)	O	O
Column charge	Q_c (kg)	O	X
Bottom charge	Q_b (kg)	O	X
Total charge	Q_{tot} (kg/hole)	O	X
Specific charge	q (kg/m ³)	O	X
Drill hole diameter	d (mm)	O	O
Charge concentration, bottom charge column charge	Q_{bk} (kg/m)	O	X
	Q_{ck} (kg/m)	O	X
Charge Height bottom charge column charge	hb (m)	O	X
	hp (m)	O	X
Uncharged section	ho (m)	O	O
Specific drilling	b (drill m/m ³)	O	O
Width of round	B (m)	O	O
Plasma energy	E_{pl} (MJ)	X	O
Peak Particle Velocity	PPV (mm/s)	X	O

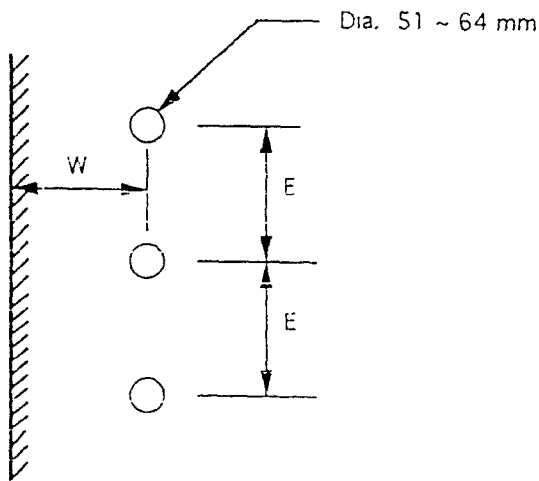
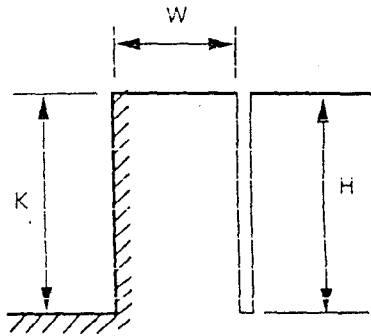
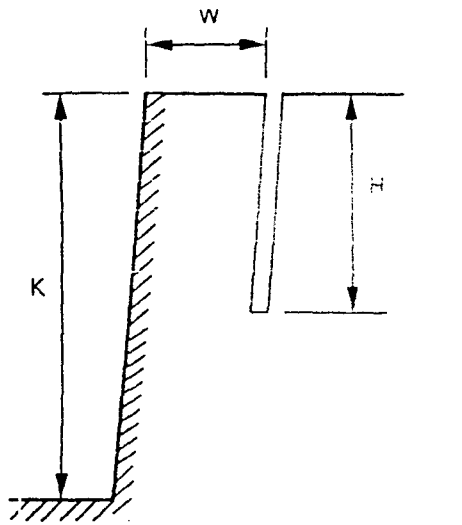


그림 3-7 계단식 파암
(K : 계단식 높이, W : 저항선,
H : 천공장, E : 공간간격)

제 5 절 심발공의 설계

터널굴착에서는 항상 터널전면의 일자유면이 파쇄대상이 될 수 밖에 없다. 따라서 이 전면틀 한 번에 발파하던가 심빼기로 자유면을 형성시키며 확대하면서 발파한다. 플라즈마에서 연속으로 인접공을 파쇄시킬 수 있는 공수가 2-3개로 제한되어 있기 때문에 화약발파에서 적용되고 있는 심발발파법인 썰기형 커트, 피라미드형 커트, 부채형 커트 및 Burn cut 등을 다양하게 활용할 수 없고 그림 3-8 과 같이 피라미드형 커트 및 그림 3-9의 대구경을 활용한 Burn cut를 적용한다.⁴⁾

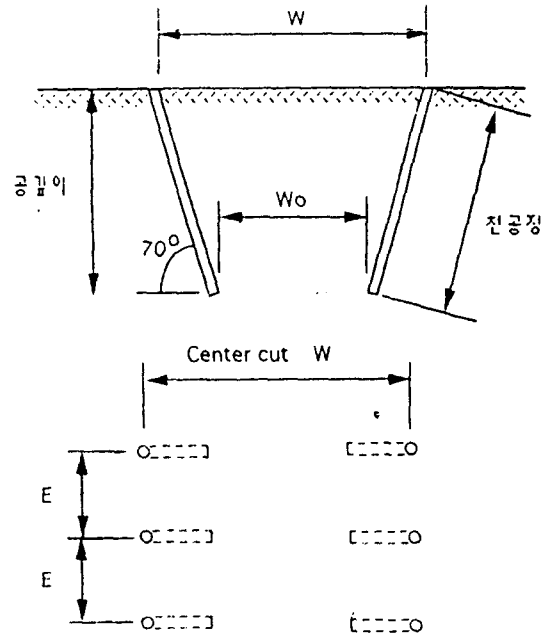


그림 3-8 심빼기 방법의 예

피라미드형 커트는 한 쌍을 동시에 기폭시킴으로써 Center cut이 가능하게 하는 것으로 일자유면에서의 암석파괴이기 때문에 계단발파에서보다 소요에너지가 크며 따라서 1회 파쇄 깊이가 상대적으로 낮고 또 발생하는 진동 수준이 높게될 경향이 있다.

4) Plasma Blasting에 의한 암석파괴 특성 연구보고서, 1995, pp. 20-23

저진동 문제가 중요한 도심지의 터널굴착에서는 되도록 일자유면이 아닌 2자유면 발파가 되도록 Pilot drilling이 된 상태에서 확공하여 굴착되는 형식을 택하여야 할 것이다. 이러한 점에서는 대구경을 가능한 burn cut가 고려될 수 있다. 일반적으로 대구경 공경과 인접한 플라즈마 공과의 거리 관계는 그림 3-10으로 개념화 할 수 있는데 대구경의 공경이 클수록 플라즈마 기폭공과의 인접거리는 떨어져도 된다.

그러나 플라즈마에서는 화약발파에서와 달리 Plasma 기폭 즉시 대구경공과 연결되는 균열

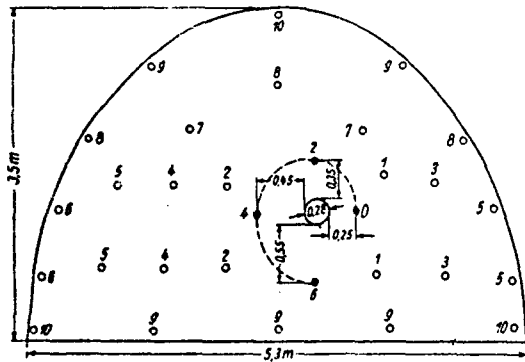


그림 3-9 대구경공에 의한 나선형식 평행공 심발기폭의 예

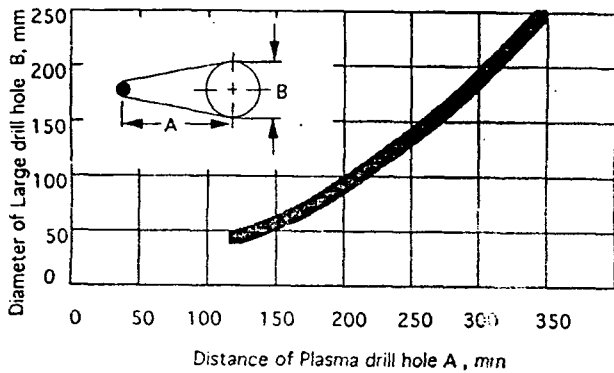


그림 3-10 대구경공과 플라즈마공과의 거리에 대한 관계

이 발생되는 경우 플라즈마 공내의 압력이 급격히 감소하므로 균열발전에 효과적인 발파가

되지 못할 수도 있다. 그러나 그림 3-9와 같이 순차적인 플라즈마 기폭이 되게 함으로써 center cut을 가능하게 할 수 있으므로 하나의 적용방법으로 고려될 수 있다.

제 6 절 기타의 굴착 설계

플라즈마 파압의 장점인 파쇄압의 비산이 없는 점을 이용한 암파쇄의 적용을 고려하면 여러 용도에 활용될 트렌치의 굴착과 강도가 높은 전석 혹은 옥석의 2차파쇄에 이용하는 방법이 될 것이다.

3.6.1 옥석 발파

화약에 의한 옥석에서 장약량은 암괴의 크기에 관계없이 0.06 ~ 0.1 kg/m³ 크기의 비장약량을 사용하여 결정한다. 또 장약공의 깊이는 최소저항선의 1.1배로 하며 옥석의 크기가 3~5m³ 일 때 공의 수는 2개로 하는 것이 일반적이다. 이때에 폭약발파에서의 문제는 암석의 비산이다. 이에 반하여 플라즈마의 경우는 충격파에 의해 옥석이 균열발생으로만 파쇄되므로 비산의 문제가 해소되며 1 MJ의 에어지로 4m³의 옥석을 파쇄시킬 수 있어 옥석의 크기에 따라 필요 에너지를 감소시켜 효율적으로 적용한다.

그림 3-11에서 보는바와 같이 천공장을 1.5m에 맞도록 옥석의 크기에 따라 수직 혹은 경사로 천공하여 플라즈마로 파쇄시킨다. 자유면이 6개 이상이 되므로 균열발생과 동시에 분출되는 반응가스의 소음을 감소시키는

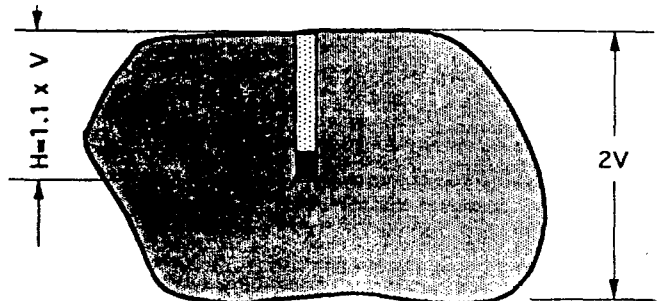


그림 3-11 옥석 발파

조치를 취할 필요가 있으나 비산의 염려는 없다.

3.6.2. 트렌치 굴착

송·배수관, 전력·가스관의 지하매설을 위해서 필요한 트렌치의 굴착은 될수록 폭이 좁게 이루어져야 한다. 기초가 암반인 경우에 불가피하게 시공되어야 할 암석 굴착작업은 폭약발파를 주거지역 인근에서 시행한다는 데에는 문제가 크지만 플라즈마 파압은 그림 3-12와 같은 방법으로하여 적용 가능하다.

천공경 50 mm, 저항선 0.6 ~ 0.7, 경사면을 3:1로하여 굴착할 때 깊이에 따른 파쇄에너지를 폭약발파의 경우를 이용하여 정리하면 다음과 같으며 실제작업에 적용하기 위한 기준이 될 수 있다.

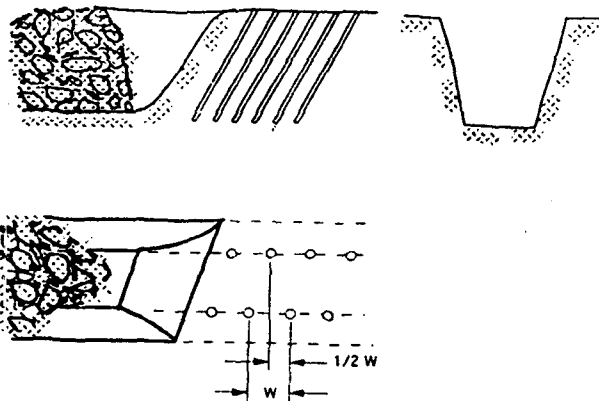


그림 3-12 트렌치 굴착 (저항선 0.7m 파쇄 에너지 1MJ)
트렌치 깊이: 1.2m, 천공깊이: 1.5m, 천공경: 50mm

제 7 절 플라즈마 시공설계

플라즈마 암파쇄는 전술된 바와 같이 환경친화적 굴착방법 즉 진동, 소음, 분진 및 비산을 최소화하면서 작업할 수 있는 것이므로 기본적인 설계에서부터 주변에 미치는 진동수준을 반영하여 설계하여야 한다.

가. 현장조사에서 대상 암반의 지질적 및 암석역학적 물성조사를 포함하여 주변에 있는

구축물과 진동원과의 거리관계를 검토한다.

나. 시험파쇄와 진동속도 계측을 통하여 기본적인 플라즈마 파쇄에너지 결정 및 굴착형식을 확정한다.

다. 작업조건에 대응하는 적정한 시스템을 결정한다.

플라즈마에 의한 충격파에서 비롯되는 지반진동은 거리에 따라 지수적으로 감소하므로 제 5장에서 계측된 진동 결과로부터 결정된 예측식을 이용하여 지반진동 허용수준을 근거로한 작업한계선을 설정한다. 그림 3-13은 지반진동수준을 5mm/s 이하로 유지시켜야 할 대상 건축물과 작업 한계선을 예시한 것으로 플라즈마 파압 작업설계에서 지반진동의 크기의 영향요소를 이해할 수 있다.

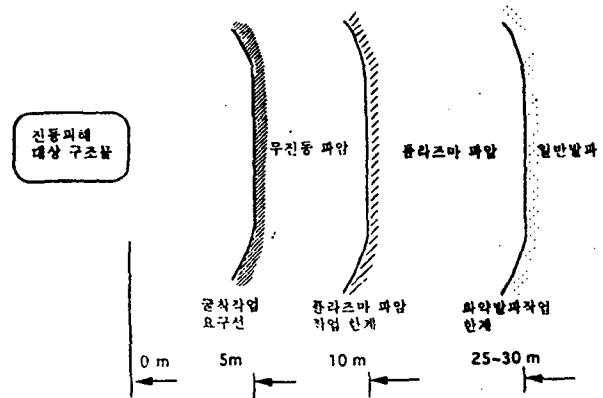


그림 3-13 지반 진동수준과 작업한계선의 관계

1) 주거지역의 대상 건축물이 조적조, 시멘트 블록조로 구성된 경우로 진동 허용기준 5mm/s를 기초로 함

2) 암반은 풍화된 화강암에서 직경 38mm, 천공장 1.5m, 플라즈마 에너지인 경우 4 MJ/hole, 화약발파는 젤라틴 다이ना마이트 187 g/hole을 기준함.