

플라즈마 발파의 폭력과 지반진동특성

이경운¹⁾ · 박철환²⁾ · 신중호²⁾ · 류창하²⁾

Analysis of Energy and Ground Vibration of Plasma Blasting

Kyung-Won Lee, Chul-Whan Park, Joong-Ho Synn and Chang-Ha Ryu

ABSTRACT Rock fragmentation with plasma blasting technique has advantageous properties in contrast to the conventional blasting method in 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-2D 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 m³ granite boulder or 1.5 m height bench face. Measurements are carried out to get the ground vibration level and propagation equation, so that the control of the blasting operations can be performed more precisely and safely.

1. 서 론

플라즈마에 의한 암석의 파쇄기술은 종래의 화약발파로 비롯되는 소음, 진동 및 암석의 비산을 최소화하는 특성을 갖고 있어 암석의 굴착작업이 인근 주민과 건축물에 피해를 주지 않기 때문에 도심지에서의 굴착작업 즉 아파트 건축을 위한 터파기 등에 활용성이 입증되고 있다.

천공내에 전해액을 넣고 전기에너지를 가함으로서 고온고압의 플라즈마가 순간적으로 발생하여 이로 인한 충격파가 주변으로 전달되면서 암석의 파괴강도를 초과하여 균열을 발생시켜 과도한 분진이나 파편의 발생없이 암석을 파쇄할 수 있는 플라즈마 암석파쇄 에너지는 개발 연구초기에 8.5 kV, 200 Amp의 입력일 때 켈라친 다이내마이트 42 gr에 대응하는 파괴능력을 가졌으나^{1,2)} 현재는 210 gr에 대응하는 크기로 발전되었다. Plasma에 의한 암석파괴에서 화약발파에서와는 달리 파쇄에너지의 조절을 통해 진동원의 크기를 작업 환경에 적절한 수준으로 최소화할 수 있는 이점과 이에 따라 화약발파에 수반되는 환경문제에 비해서 여러 이점을 갖고 있다.

2. 플라즈마 발파시스템과 암석파쇄 원리

2.1 플라즈마 장치

이 장치는 Fig. 1과 같이 전기에너지를 고전압 전원부에 의해 고압으로 변환시켜 Capacitor에 충전후의 사방전 스위치(pseudo-spark switch)를 통해 일시에 방전시키면 10 kV의 고전압과 200 Amp의 대전류로 변환된 전기에너지가 생성되고 동축케이블을 따라 전극선 말단의 전극사이에서 아크의 발생으로 고온·고압의 플라즈마의 전리현상이 일어나 화약발파에서의 폭굉파에 비교될 수 있는 순간적인 충격파가 암석에 존재하는 균열의 발생 및 확장을 유도하여 암석파쇄에 이르게 된다.

전리기체의 강한 진동현상 즉 Plasma 진동현상을 일으키는 펄스형 전기에너지의 순간펄스폭은 그 폭을 줄일수록 출력이 커져 균열발생 효과를 높이는 강력한 충격파의 발생에 유리하지만 시스템에 의해 결정될 요소이며 Fig. 2에서 볼 수 있는 것과 같이 플라즈마를 발생시키는 방전시의 전압-전류 곡선에서 전기에너지에

1) 한국자원연구소 소장

2) 한국자원연구소 선임연구원

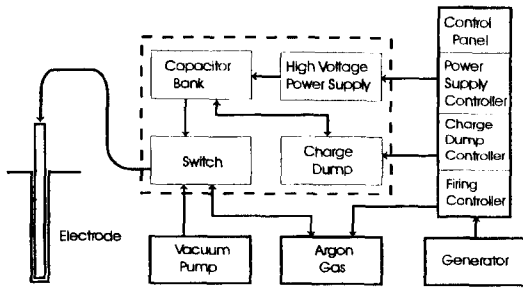


Fig. 1. Plasma blasting system

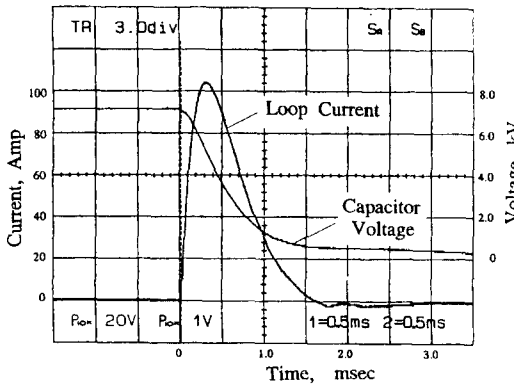
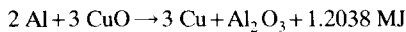


Fig. 2. The loop current and capacitor voltage history during a typical plasma discharge

의한 파쇄에너지는 280 kJ로 계산된다. 이 수준으로는 옥석파쇄에는 충분하지만 계단발파 등에는 미치지 못하므로 전해액에 알루미늄과 산화동 분말을 섞어 다음의 반응식과 같은 Goldschmidt 환원반응을 통해 파쇄 에너지를 추가시킨다.³⁾



즉 알루미늄 1 gr의 연소에 의한 이론적 발생에너지는 22.3 kJ이다. 실험적 적정비율로 조성된 전해액에서 알루미늄 30 gr으로 얻어지는 화학적 파쇄에너지는 0.67 MJ이 되므로 전기적 에너지를 합하면 0.95 MJ이 되는데 이 크기가 한 개의 플라즈마 시스템이 갖는 발파에너지라 할 수 있다.

2.2 플라즈마 발파에너지의 크기

플라즈마 시스템에서 발생하는 이 0.95 MJ의 파쇄 에너지를 상대적 폭발력(relative weight strength)으로서 대비하면 화학적 폭발에너지가 3.91 MJ/kg인 ANFO의 243 gr에 해당되는 위력과 같으며 젤라친 다이나마이트

Table 1. Equivalent weight strength of explosives to the plasma blasting (unit: gram)

Explosives	in RWS		Final estimation
	theoretically	by equation	
Korean			
GD HiMite 6000	185	164	180
GD HiMite 5000	196	172	200
New Mite 4000	276	236	280
Finex I	308	266	310
American			
ANFO	243	205	230
Gelatin	209-222	205	210
Dynamite			
Slurry(Ireseis)	279-295	250	280
Swedish			
Emulite(100)	312	253	310

로는 209~222 gr, 또는 에멀라이트로는 312~328 gr에 해당하는 이론적 폭발에너지와 같다. 그러나 화약으로 암석을 파쇄하는 발파력, s는 화학적 에너지, e 이외에 가스의 발생량, v에 영향을 받기 때문에 다음과 같은 Langefors-Kilström 경험식을 사용하여 화약의 발파력을 비교할 수 있다.⁴⁾

$$s = \frac{5e}{6} + \frac{v}{6}$$

즉 가스발생량이 ANFO에 비하여 1.2% 밖에 되지 않는 플라즈마에서 상대적 발파력은 따라서 크게 줄어 ANFO 205 gr으로 계산된다. Table 1은 현장시험 결과를 대비하여 추정한 각종 폭약에 대한 플라즈마 시스템의 발파력을 보여주고 있다.

3. 플라즈마 계단발파의 수치모델

3.1 전산 모델링 해석기법

계단식 발파를 플라즈마에 의해 수행할 때 나타나는 파쇄현상의 전산모델링을 위해서 2차원적 입자유동해석 프로그램인 PFC-2D (Particle Flow Code)를 이용하였다. 개별요소법을 기본으로 한 이 프로그램의 수행상 기본설정은 개개의 입자요소가 원형의 강성체로서 입자간의 접촉형태는 극히 작은 면적 즉 점으로 간주하며 접촉점에서 접촉력과 힘-변위 관계식이 성립되어 접촉된 입자간의 결합강도를 규정해 줄수 있어 암석의 모델로 정하여 정적 및 동적인 거동문제를 해결할 수 있

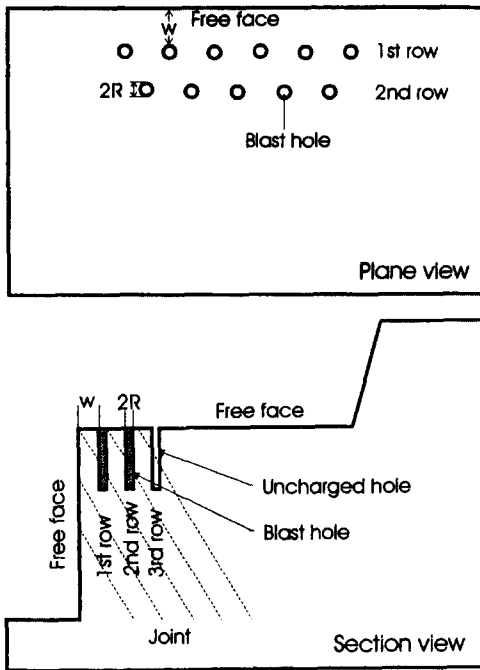


Fig. 3. The model of rock bench blasting

다.⁵⁾ 플라즈마의 발파력은 가스발생으로 보다는 반응할 때 생기는 충격파에 의한 것이므로 모델링에서도 이 충격파의 영향만 고려한다. Fig. 3은 암석 계단의 모델 형태를 보이며 여기서 공간격 및 제 1열 자유면과의 거리는 각각 60 cm로 하였고 발파공경은 모델링시 최소 요소입자 크기인 10 cm로 하였다.

입력자료인 대상 암반, 기존 절리 및 전색물의 물성은 Table 2와 같이 정하여 사용하였으며 발파에 의하여 발생하는 폭굉압은 플라즈마 발파시스템의 방전곡선이 Fig. 2에서와 같이 지속시간이 1.5 msec인 sine 함수와 유사한 펄스에 의한 것임으로 1/2 주기내의 sine 함수형태로 모델링하였다. 즉

$$P_b = P_0 \cdot \sin(2\pi ft), \quad f = 1/t_0, \quad 0 \leq t \leq t_0/2$$

여기서 P_b 는 공내의 발생압력, P_0 는 최대압력치, f 는

주파수, t_0 는 sine 함수의 주기이다. 해석모델에 대한 동적해석 real timestep은 1.055×10^{-5} sec 이기 때문에 모델링에서는 약 140배로 지속시간을 정한다.

3.2 암석파쇄 에너지

화강암에 해당되는 입력 값으로 암석계단의 평면모델의 단일공 Fig. 4에 대한 발파효과를 얻기 위해 해석된 P_0 값은 692 MPa 이었으며 2개공 동시발파때는 620 MPa, 4개공 동시발파때는 604 MPa로 감소되는 것으로 나타나 단일공에 비하여 동시발파는 필요한 에너지 수준이 87~90% 낮아도 균열발생이 가능하게된다. 또한 계단발파모델에서 제 1열과 제 2열의 동시발파 및 지발발파를 분석한 결과는 Fig. 5~7에서 볼 수 있듯이 파쇄양상이 다른 효과를 보여준다. 동시발파때에는 파쇄균열이 발파공 사이는 물론 벤치면까지 연결되지만 비산이 없는 양상이며 지발의 경우 발파공내에

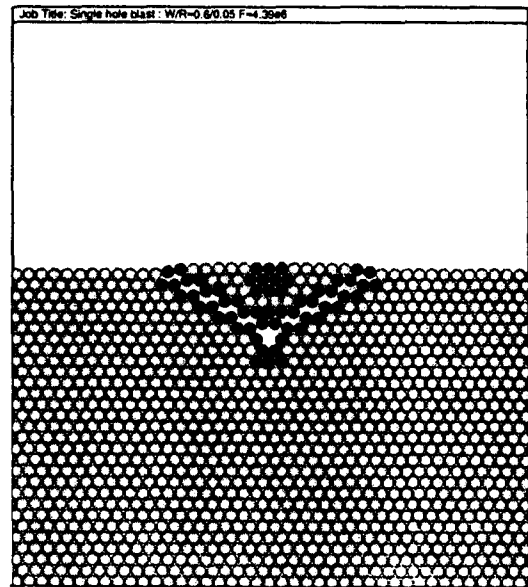


Fig. 4. Fragmentation pattern for the plan view model of single hole

Table 2. Physical properties of input data for modelling

	Density (kg/m ³)	Normal stiffness, Kn (N/m)	Shear stiffness, Ls (N/m)	Normal bondage (Pa)	Shear bondage (Pa)	Friction
Rock	2500	1×10^9	1×10^9	1×10^6	2×10^6	0.5
Tamping Material	2500	1×10^7	1×10^7	1×10^1	2×10^4	0.1
Joint				0	0	0

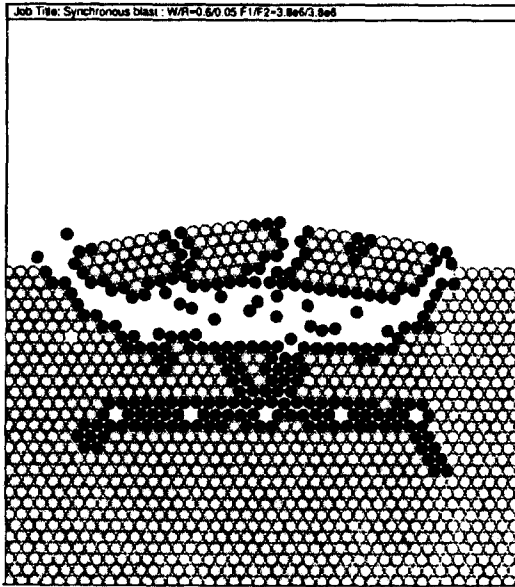


Fig. 5. Fragmentation pattern for the plan view model with simultaneous blasting of 1st and 2nd rows

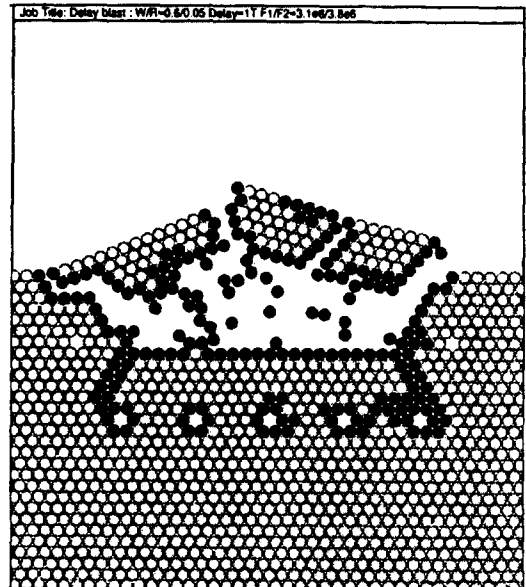


Fig. 7. Fragmentation pattern for the plan view model with 1.0 period delayed blasting of 2nd row

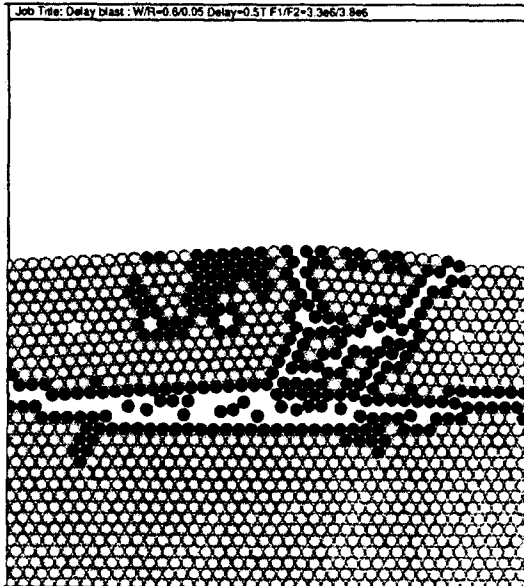


Fig. 6. Fragmentation pattern for the plan view model with 0.5 period delayed blasting of 2nd row

압력이 지속되는 시간에 따라 달라서 1/2 주기 지발발파인 경우 2열 주위의 파쇄상황이 더 좋은 것을 보여주고 있다(Fig. 6). 여기서 1주기라 함은 발파에 의해 발파공내에 작용하는 발생압력의 지속시간으로 1/2 주기

Table 3. Fragmentation energy ratio with delay interval

Delay interval	Bodywork energy, E_b	Kinetic energy, E_k	Strain energy, E_s	$\frac{E_k}{E_b}$	$\frac{E_s}{E_b}$
Simultaneous	0.898	0.360	0.521	0.40	0.58
0.5 period	1.112	0.438	0.544	0.39	0.49
1.0 period	4.449	3.173	0.898	0.71	0.20
2.0 period	3.461	2.028	0.850	0.59	0.25
5.0 period	2.777	1.572	0.665	0.57	0.24

는 0.75 msec에 해당한다. PFC 해석에서는 각종 에너지 계산이 가능하여 각 입자가 파쇄, 비산운동에 의해 생성되는 kinetic 에너지와 파쇄에 이용되지 않고 내부에 축적되는 strain 에너지를 외력에 의한 body work energy에 대한 비로써 표시하면 Table 3과 같이 분석된다.

이 결과에서 보면 1주기 지발발파때 파쇄와 비산운동에 관련되는 kinetic energy의 작용이 가장 크게 나타나고 있으며 파쇄가 가능한 최소하중의 비교에서도 1/2 주기 이상의 지발발파에서는 1열의 입력하중은 2열의 10~15% 이상 낮게 하여도 벤치 자유면까지 파쇄가 이루어지는 효과가 있는 것으로 나타났다. 벤치의 수직단면 모델에서도 파쇄효과 분석이 이루어져 암석 파쇄 양상이 규명되었으나 여기서 생략한다.

3.3 절리의 형태가 주는 파쇄영향

플라즈마 발파에서 파쇄효과를 증대시키는 요소는 충격파에 의한 균열발생과 기존균열의 확대라고 할 수 있다. 따라서 암반내에 존재하는 기존 절리의 영향을 벤치평면 및 수직모델로 해석하였다. 벤치평면모델에서 발파는 1열과 2열내 2개공의 동시발파로 하였고 하중입력값은 620 MPa로 하였다. 여기서 절리면의 강도는 0으로 한다. 경사진 절리모델에서 충격파의 전파방향과 90° 이상을 이루는 부분에서는 절리를 따라 에너지가 모두 방출되어 절리로 나누어진 암괴의 비산만 크게 일어났고 90° 이내의 예각을 이루는 부분에서는 절리를 뚫고 새로운 균열이 발생하여 파쇄가 비교적 잘 일어났다. 벤치단면모델에서는 입력하중을 절리가 없는 경우와 동일하게 696 MPa로 하였다.

다양한 절리의 영향중 특히 절리가 암반 내부로 경사지게 존재할 때 Fig. 8과 같이 절리의 벌어짐과 함께 절리에 직각방향으로 새로운 균열도 많이 발생하여 파쇄가 크게 진행되었고 Fig. 9에서와 같이 암반 바깥쪽으로 절리가 경사지게 존재하는 경우에도 절리는 벌어지며 파쇄도 잘 일어나지만 앞서 경우에 비해 새로운 균열의 발생이 적은 것으로 나타났다. 이는 절리부분으로 에너지의 방출이 보다 컸음을 의미한다. 이상의 검토결과를 종합하면 플라즈마에 의한 발파효과는 균열발생

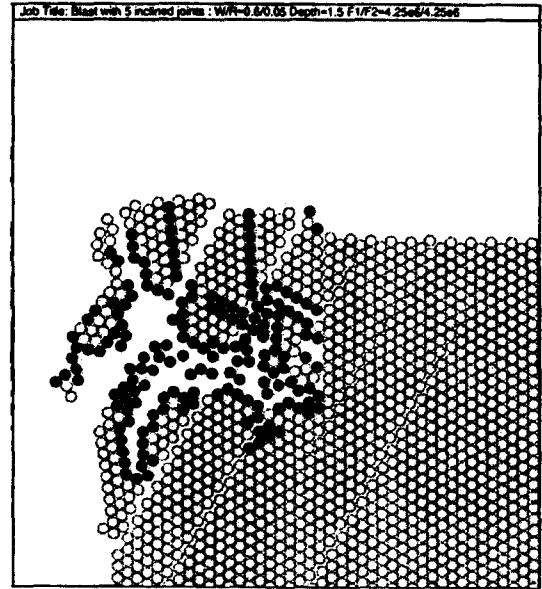


Fig. 9. Fragmentation pattern for the section view model with a joint set inclined outward the rock bench

에 있으므로 발파공내의 발생에너지 크기 및 지속시간, 암반특성과 발생압력파의 주파수특성에 의존하는 감쇠 형태의 규명에 의하여 더 정량적인 해석결과를 얻을 수 있다고 판단된다.

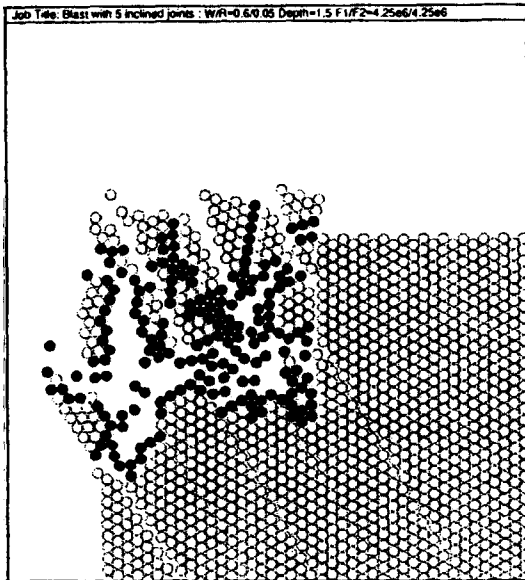


Fig. 8. Fragmentation pattern for the section view model with a joint set inclined inward the rock bench

4. 플라즈마 발파에 의한 지반진동 특성

도심지 건설현장의 암반굴착작업에서 민원의 대상이 되고 있는 것은 작업시 발생하는 지반진동, 소음 및 비산이며 이것은 사전 설계평가의 주요 기준이 되고 있다. 플라즈마를 이용한 암석의 파쇄작업은 화약발파를 대체하는 굴착방법으로 개발되었고 발생원의 특성이 상이함으로 현장계측을 통하여 상세히 검토하였다.

4.1 진동수준과 전파 예측식

건축물 피해수준의 척도는 플라즈마 발파에서도 최대 진동속도를 기준으로 하여 현장 계측결과를 분석하였다. 진동에 의한 영향은 진동의 수준, 진동지속시간, 진동주파수에 따라 좌우된다. 지반진동 전파의 예측을 위한 일반식은 거리를 장약량으로 환산한 형태로 다음과 같이 표시할 수 있다.

$$PPV = k \left(\frac{D}{W^b} \right)^n$$

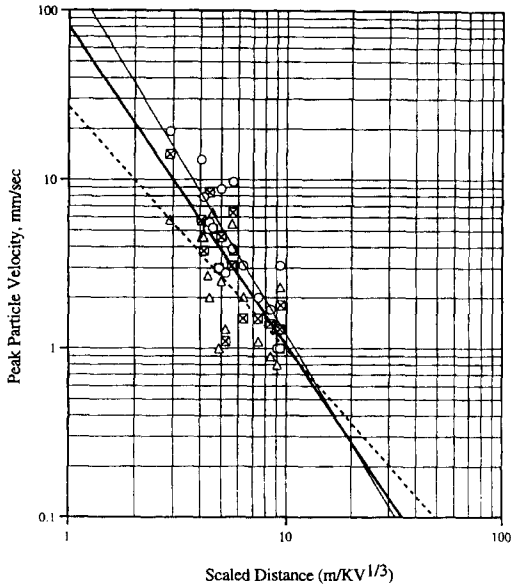


Fig. 10. Peak particle velocity vs. scaled distance
 — ⊠ V PPV(V) = 80.0 × (SD)^{-1.887}
 — ○ L PPV(L) = 162.0 × (SD)^{-2.130}
 — △ T PPV(T) = 26.971 × (SD)^{-1.437}

여기서 PPV(mm/s)는 최대 진동속도, D(m)는 폭원으로부터의 거리, W(kg)는 지발당 최대 장약량, n은 감쇠지수, b는 환산지수, k는 자유면의 상태와 화약의 성질, 암질 등에 따르는 상수이다. Fig. 10에 보인 것처럼 플라즈마 발파시스템에 의한 진동계측결과를 장약량 대신 시스템의 사용전압 kV로 한 x-축에 대한 값으로 그려보면 진동계측식은 다음과 같이 분석된다.

$$PPV(V) = 80.0 \left(\frac{D}{kV^{1/3}} \right)^{-1.887}$$

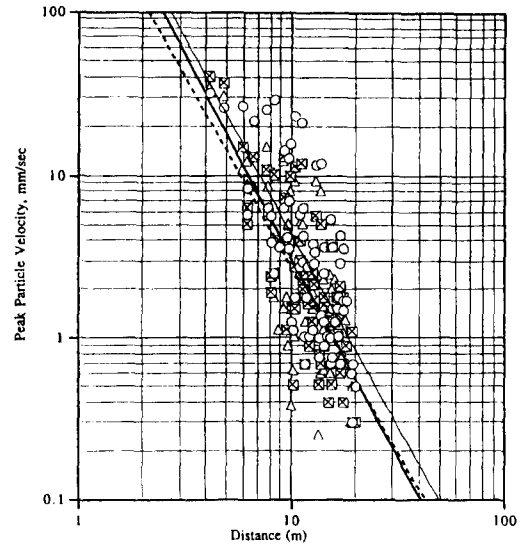
$$PPV(L) = 162.0 \left(\frac{D}{kV^{1/3}} \right)^{-2.130}$$

$$PPV(T) = 27.0 \left(\frac{D}{kV^{1/3}} \right)^{-1.437}$$

상관계수는 진행방향성분 0.854, 접선방향성분 0.826 수직방향성분 0.68의 다소 낮은 적합도를 갖는다. 각 성분에 대해 단순 거리별로 보면 Fig. 11과 같이 상관관계가 높아진다.

진동전파식은 단순거리로 표시하면

$$PPV(V) = 969.3 D^{-2.482}$$



Peak Particle Velocity vs. Distance
 PlasmaBlast_V, L, T
 96-09-04

Fig. 11. Peak particle velocity vs. distance
 ⊠ V, mm/s PPV(V) = 969.3 × (D)^{-2.482} r = 0.775
 ○ L PPV(L) = 1087.5 × (D)^{-2.385} r = 0.703
 △ T PPV(T) = 581.5 × (D)^{-2.311} r = 0.698

$$PPV(L) = 1087.5 D^{-2.385}$$

$$PPV(T) = 581.5 D^{-2.311}$$

상관계수는 각각 수직방향성분 0.775 진행방향성분 0.703 접선방향성분 0.698을 보여준다. 함수폭약을 사용한 화약발파와 비교하기 위해 발파원으로부터 15~50 m 떨어진 거리에서 측정된 자료를 정리하여 보면 다음과 같다.

$$PPV(L) = 189.6 D^{-1.152}$$

$$PPV(T) = 590.7 D^{-1.463}$$

$$PPV(V) = 588.2 D^{-1.510}$$

감쇠지수 n 값이 플라즈마 발파에서는 평균 2.0 인데 비하여 화약발파의 경우 1.5를 보여주고 있어 플라즈마 발파의 경우 거리에 따른 감쇠경향이 빠른 것으로 보인다.

4.3 진동수, 소음 및 암석비산

진동의 이력곡선을 검토한 결과 플라즈마 발파의 경우 진동의 지속시간은 진동속도가 0.5 mm/s 이하의 수준이 될 때 50 ms 정도이지만 화약발파일 경우 폭원의

로부터 15~20 m 떨어진 지점에서 0.5 mm/s이 되는 지속시간은 대부분 100 ms 이상을 보여주고 있다. 진동주파수에서도 탁월주파수 대역은 30~110 Hz 범위에 많이 분포되어 있어 20~70 Hz의 분포를 보이고 있는 화약발파의 경우와 비교하여 높은 주파수대에 있음을 알 수 있다. 동시에 계측된 자료가 아니어서 직접적인 대비에는 부족하지만 플라즈마의 경우 지반진동이 고주파 대역에 분포하는 것이 확인되고 있다. 구조물의 고유주파수 대역과 손상도를 감안하면 저주파수 대역이 더 잠재력이 높다는 면에서 플라즈마의 안전성을 유리하게 평가할 수 있다. 소음수준은 A-weight로 측정된 결과를 볼 때 천공장비와 같은 건설장비로 인한 background 수치와 비슷한 수준이지만 충격음이라는 점과 blast mat에 의해서 쉽게 15 dB 정도 경감시킬 수 있는 특징이 있으며 가장 뚜렷한 차이의 하나는 비산의 발생이 거의 없다는 점이다. 플라즈마에 의한 암석파쇄의 경우 근거리 계측이 가능할 수 있을 정도로 비산이 발생하지 않으며 그 원인은 충격파에 의해 파쇄대를 형성하며 가스압의 발생이 거의 없다는 점인 것으로 판단된다.

5. 결 론

플라즈마 발파기술은 도심지에서 암석 굴착작업을 해야할 때 화약발파와는 달리 진동, 소음 및 비산을 최소화할 수 있는 굴착방법으로 개발되었다. 플라즈마의 발파력은 전기적 입력에 의한 충격력 발생 외에 Goldschmidt 화학반응에 의한 발파에너지의 증가로 초기에 목표로 하였던 옥석발파의 차원을 넘어 계단발파를 가능케 하였으며 0.95 MJ에 대응하는 화약의 분량으로 표현할 수 있게 되었다. 수치해석에 의한 결과

는 충격력만으로 균열이 발생하는 플라즈마의 특성에 따라 현장 발파설계에 활용할 수 있도록 검토되었으며 지반진동자료로부터 진동수준을 예측할 수 있는 진동전파식을 유도하였다. 플라즈마에 의한 진동은 그 특성상 감쇠지수가 화약발파에서보다 커서 진도의 감소현상이 더욱 빠르게 나타나며 소음과 비산에 있어 매우 유리한 것이 확인될 수 있었다. 인구조밀지역에서 또는 건축구조물을 진동피해로부터 보호해야하는 경우 활용될 수 있는 암석파쇄기술로서 플라즈마발파는 획기적인 기술분야라고 할 수 있다.

사 사

본 연구는 서울대학교 원자핵공학과, 수산그룹 중앙연구소와 공동으로 추진한 결과의 일부로서 한국 가속기 및 플라즈마 협회의 지원에 감사한다.

참 고 문 헌

1. 이경운, 박철환, 류창하, 신중호, 1995, Plasma Blasting에 의한 암석파괴 특성 연구, 한국자원연구소
2. 이경운, 박철환, 류창하, 신중호, 1996, Plasma Blasting에 의한 암석파괴 특성 연구(II), 한국자원연구소
3. 특허출원, (주)수산특장 1995. 10. 30 골드슈미트 파압장치
4. Persson, PA, Holmberg, R, Lee, J, 1994, Rock blasting and explosives engineering, pp 195 CRC Press
5. Potyondy, D.O, Cundall, P.A., 1996, Modeling of shock- and gas-driven fractures induced by a blast using bonded assemblies of spherical particles. Rock Fragmentation by Blasting: pp 55-62. Rotterdam, Balkema.