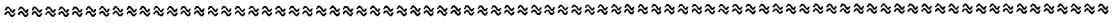


Plasma破岩 實驗討論會

The discussion on the Plasma blasting Experimentation

朴 徹 和*
C. H. Pak



要 約

지난 3月 27日 코롱建設(株) 會議室에서 그간 (株)水上重工業에서 새로 開發한 Plasma破岩裝備에 對한 數次에 걸친 實驗結果를 가지고 開發者인 제환영 博士, 開發 DATA에 對한 分析을 맡았던 韓國資源研究所 유창하 博士, 實驗詩 Plasma 破岩의 岩種別 識別 및 類似機種과의 比較 등을 檢討한 바 있는 許墳博士, 그리고 Plasma 裝備를 가지고 처음부터 끝까지 現場實驗을 맡아 본 朴徹和 火藥類管理技師(전문建設(株) 次長) 등 討論會에서 發表한 內容이다.

ABSTRACT

An overview of the plasma rock fragmentation system, the first commercial application of plasma blasting, is presented. Plasma blasting is based on the fast delivery of stored electrical energy to fracture the rock. The capacitor bank, switching device, cable and blasting electrode employed in the system are described. Utilization of the chemical energy delivered from the electrolyte and the development of a large charge transfer switch using pseudospark enabled the commercialization. The vibration and noise level of the blasting is acceptable in the most ground breaking.

I. 프라스마 장비원리

Plasma Rock Fragmentation System

제 환 영 박사**

1. Introduction

Nobel이 Dynamite를 발명한 이후 화약을 사용한 발파는 토목, 건설에 없어서는 안되는 중요한 수단이다. 그러나, 화약은 안전성에 많은 문제점이 있어서 운반, 보관, 취급이 까다롭고 특히, 도심지나 인구밀집 지역에서의 화약발파는 진동, 소음, 분진이나 비석으로 인하여 거의 사용할 수 없게 되었다. 이러한 화약발파의 문제점을 해결하기 위해서 Noranda사와 Maxwell사가 공동으로 Plasma Blasting을 이용한 암반

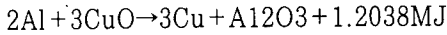
파쇄방법을 개발하기에 이르렀다(1)(2). 그러나, Noranda사와 Maxwell사는 암반파쇄를 전적으로 전기에너지에 의존하여 1MJ이상의 전기에너지를 충전할 Capacitor Bank와 수백 kA의 전류를 흘릴 스위치와 케이블이 필요하여, 하루에도 백번 이상 발파할 수 있는 상용장비를 개발하기에는 미흡하였다.

Plasma Blasting은 저장된 전기에너지를 암반속의 전극사이에 있는 전 해액에 순간적으로 방전시킴으로써 발생된 고온, 고압의 Plasma에 의하여 암반을 파쇄시키는 방법을 말한다. 순간적으로 발생된 고온, 고압의 Plasma는 급속히 팽창하여 Shock Wave를 만들고, 이 Shock Wave는 암반속에 Stress Field를 형성시켜 암반을 파쇄시킨다.

Plasma Rock Fragmentation System은

* 專門建設(株) 次長
* * (주) 수산중공업 중앙연구소

축전기에 충전된 전기에너지를 암반속의 전극 사이에 있는 전해액에 순간적으로 방전시켜 테르미트 반응을 유도하고, 테르미트법에 의해서 발생된 고온 고압의 가스에 의해서 암석이나 암반을 파쇄시키는 장비인데, 그 화학적 반응식은 다음과 같이 나타내어 진다.



따라서, Plasma Rock Fragmentation System은 테르미트 반응을 순간적으로 유도하기 위한 고전압과 대전류의 Pulse Power 전원 장치로서 발파 에너지를 대부분 테르미트법에 의한 화학에너지에서 도출하므로, 전적으로 전기 에너지에 의존하는 기존의 Plasma Blasting 전원장치보다 크기와 용량을 현저히 줄이는 것이 가능하였다.

2. System Configuration

Pulsed Power를 이용하여 암반을 발파하기 위해서는 기본적으로 전기 에너지를 충전할 Capacitor Bank와 Capacitor Bank에 고압으로 전기를 충전하기 위한 High Voltage Power Supply, 순간적으로 암반속에 있는 전극에 전기를 흘릴 수 있는 Switch와 Cable이 필요하다. 이외에도 안전을 위하여 비상사와 매 발파시 Capacitor Bank에 남아있는 전기를 방전시킬 Charge Dump와 발파시스템을 제어할

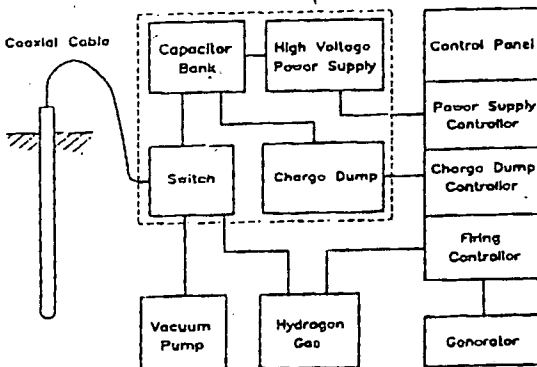


그림 1. Plasma Rock Fragmentation System Configuration

Controll Panel이 있다. 모든 고전압 부위는 안전을 위하여 그림 1과 같이 알루미늄 상자속에 차폐되어 있으며, 암반속의 전극으로 연결하는 동축케이블의 Shield선도 알루미늄 상자에 연결하여 순간적인 전자기장의 변화에 의한 강한 전자기파의 발생을 억제하였다.

(1) Capacitor Bank

Plasma Rock Fragmentation System에 사용된 Capacitor는 Aerovox사의 Metallized Electrode Capacitor로써 충전에너지 밀도가 크고(0.77KJ/Kg), Capacitor의 Metallized Electrode 사이에 절연과파가 생겼을 때 Self Clearing이 가능하여 안전성이 좋으며 수명이 긴 Capacitor이다(3). Plasma Rock Fragmentation System의 Capacitor Bank의 Specification은 다음과 같다.

Capacitance : $830 \mu F \times 10ea = 8.3mF$
 Maximum Voltage : 11kV
 Rated Voltage : 9kV
 Max. Stored Energy : 500kJ
 Bank Size : $406mm \times 178mm$
 $\times 787mm \times 10ea = 0.57m^3$
 Design Life(11kV) : 20,307 shots
 Design Life(9kV) : 413,000 shots

(2) Power Supply

High Voltage Power Supply는 위상제어를 사용한 Constant Current Power Supply로써 Maximum Output Power가 12kW이고 1Ampere로 12kV까지 충전할 수 있다. 입력전 원으로써 단상 AC 220 Volt, 15kW의 상용이나 발전기의 전원이 필요하다.

(3) Charge Dump

비상사와 매 발파시 Capacitor Bank에 남아있는 전기를 방전시키기 위하여 두가지의 Charge

Dump가 있다. 주 Charge Dump는 3kV이상 충전되어 있을 때 100 Kohm의 저항을 통해서 방전시키며, 보조 Charge Dump는 3kV 미만으로 충전되어 있으면 최고저항이 2 Kohm인 가변저항을 통해서 빠른 속도로 방전시킨다. 작업자의 안전을 위해서 매발과 후에 보조 Charge Dump를 작동시켜서 Capacitor Bank에 남아 있는 전기를 방전시키도록 하였다.

(4) Pseudospark Switch

고전압, 대전류, 대용량의 전류를 흘릴 수 있는 스위치로써 Ignitron과 Spark Gap 스위치를 생각할 수 있으나 Ignitron은 Mobile Type에서는 생각할 수 없고, Spark Gap 스위치는 수명에 문제가 있다. Pseudospark Phenomenon이 1979년에 발견된 이후(4) Pseudospark Phenomenon을 이용한 많은 스위치가 개발되어 있지만 대전류와 대전하의 전기를 흘릴 수 있는 스위치는 개발되지 못하였다. Pseudospark Phenomenon은 동공음극에서 그림 2에서와 같은 Paschen Curve의 Paschen's Minimum의 왼쪽에서 일어나는 현상으로서 압력과 Spark Gap의 곱이 적을수록 오히려 Breakdown Voltage가 높아진다.

Pseudospark의 Breakdown Voltage는 압력과 Spark Gap의 관계에서 Paschen's Rule

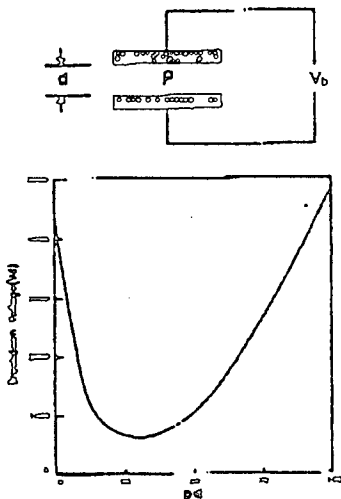


그림 2. Paschen's Curve

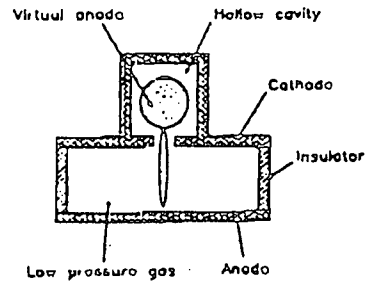


그림 3. Pseudospark Phenomenon

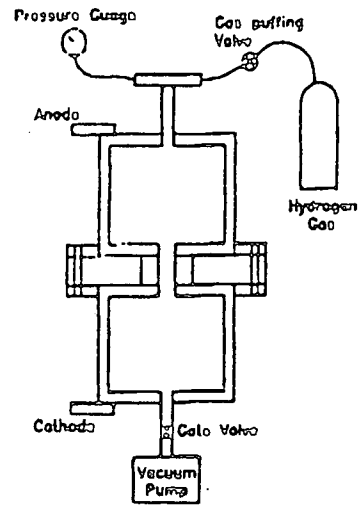


그림 4. Pseudospark Switch의 구성도

과 다른 법칙을 보이고 있으며(5), 그림 3에서와 같이 동공음극안에 형성된 Virtual Anode와 Hollow Cathode 사이에 일어나는 급속한 방전으로 생각되어지고 있다(6).

Pseudospark Discharge는 Hollow Cathode의 전표면으로 방전이 형성되어 전극의 손상이 적고 균등하여 대용량의 전류에도 수명이 긴 스위치로 사용 가능하나, Pulse 폭이 긴 방전에 대해서는 Anode와 Hollow Cathode 사이에 절연체가 없으면 처음에는 Pseudospark로 방전이 시작되나 시간이 경과함에 따라 Anode와 Hollow Cathode의 대면에 Arc Discharge로 발전되는 문제점이 있다. 여기에서 개발한 Pseudospark Switch는 고온, 고밀

도의 Plasma에 견딜 수 있는 세라믹으로 제작된 절연체를 사용하였으며, 세라믹 표면에 전극에서 Sputtering된 금속이 증착되어 절연성을 잃지 않도록 세라믹의 특성을 조정하여 금속의 증착을 방지하였다.

Plasma Rock Fragmentation System의 Pseudospark Switch의 구성은 그림 4와 같으며, Base Pressure가 $4-8 \times 10^{-2}$ torr인 스위치 안에 Gas Puffing Switch를 통하여 가스통에 있는 수소가스를 흡입시켜서 스위치 안의 압력을 높임으로써 Switching이 일어나도록 하였다. Gas Puffing으로 Trigger되는 Pseudospark Switch는 Gas Puffing Switch가 고전압 부위와 멀리 떨어져 있어서 스위치 작용으로 인한 전기적 유도가 없고, 가스 압력에 따라서 Switching이 되므로 신뢰성이 좋은 스위치이다.

스위치의 마모는 고온, 고밀도의 Plasma가 지나는 두 대면 전극의 Hole 부분과 세라믹의 Hole 부분에서 일어나므로 Hole 어느 정도 이상 커지면 이 부분만 교체하면 된다. 지금까지 스위치의 사용실적으로는 오백내지 천회마다 대면 전극과 세라믹을 교체하면 되었다. 대면 전극은 아야크에 잘 견디는 구리 텅스텐으로 만들었으며, 다른 스위치 부분은 Stainless Steel로 제작하였다. Anode와 Hollow Cathode을 대칭적으로 제작하므로써 Voltage Reversal에도

동작되도록 하였다.

(5) Coaxial Cable

암반속의 전극과 스위치는 Coaxial Cable로 연결하였다. 동축케이블의 굵기는 수백 kA의 전류를 흘릴 수 있으면서 작업하기에 무겁지 않도록 굵기를 조정하였다. 동축케이블의 Shield선은 고압전원부의 차폐장치인 알루미늄상자에 연결하므로써 안전성을 도모하면서 발파시 강한 전자기파의 발생을 차단하였다. Plasma Rock Fragmentation System에 사용된 Coaxial Cable의 Specification은 다음과 같다.

Maximum Voltage : 12kV
 Maximum Current : 300kA
 Inductance : 0.118 μ H/m
 Capacitance : 0.235nF/m
 Cable Diameter : 30mm
 Cable Length : 50m

(6) Blasting Electrode

동축케이블에 연결된 발파전극에 그림 5에서 보여주는 것과 같이 두가닥의 전선끝이 전해액에 잠겨있는 형태로 되어있으며, 깊이가 1.5~2m인 Bore Hole의 맨 밑부분에 전해액이 있고, Bore Hole의 나머지 부분은 모래에 채워져 있다. 전해

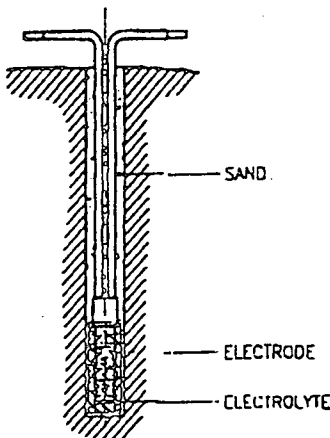


그림 5. Blasting Electrode

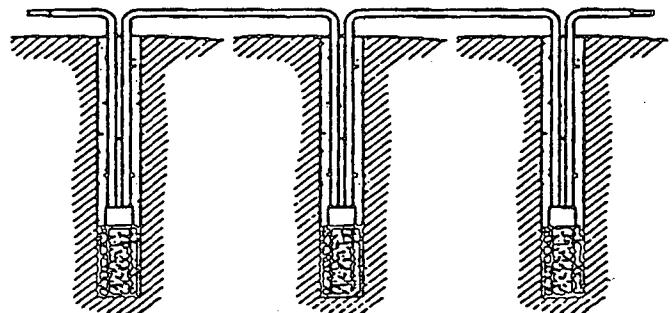


그림 6. Serial Blasting Electrodes

액은 알루미늄 분말과 금속산화물 분말로 이루어져 있으며, 알루미늄과 금속산화물의 환원반응인 Gold-Schmidt 환원법으로 대량의 발파에너지를 얻고 있다. 원래 알루미늄과 금속산화물은 보통상태에서는 폭발적으로 반응하지 않지만, 밀폐된 상태에서 두전극 사이에서 생성된 고온, 고압의 플라즈마에 의해서 폭발적으로 반응한다. 여러개의 Blasting Electrode를 그림 6과 같이 직렬 연결하여 동시에 파쇄하므로써 대량의 암반을 파쇄하는 것이 가능하며, 하나의 Plasma Rock Fragmentation System으로 세 개의 발파공을 안정적으로 동시에 파쇄할 수 있다.

3. Discharge Results

두 종류의 다른 부하에 대해서 방전시킨 결과가 그림 7과 그림 8에 도시되어 있다. 그림 7의 결과는 동축케이블의 길이가 그림 8의 결과보다 두배 긴 경우이며, 그림 7의 눈금은 전압이 2kV/div, 전류는 15kA/div이고, 그림 8의 눈금은 전압이 2kV/div, 전류는 30kA/div이다. 따라서, 7.2kV의 충전 전압에 대해서 Peak Current가 각각 약 78kA, 153kA이고, 펄스 폭이 각각 700 μ S, 360 μ S 방전 결과를 얻었다. 전압은 Tektronic사의 High Voltage Probe로 측정하였고, 전류는 Rogowski Coil로 측정하였다.

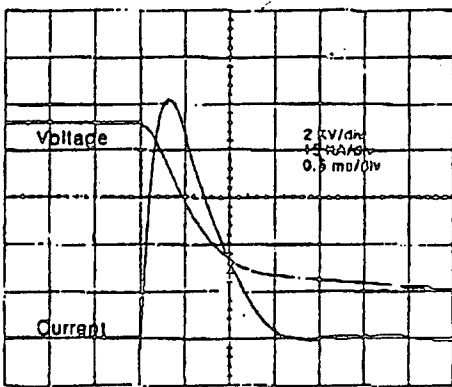


그림 7. Discharge Wave Form for Large Resistance Cable

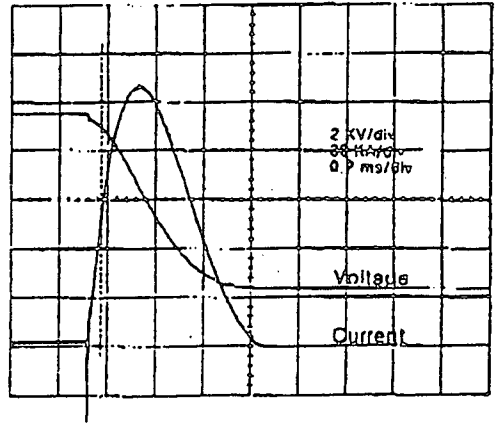


그림 8. Discharge Wave Form for Small Resistance Cable

4. Rock Breaking

두해 동안의 암반파쇄 시험결과에 따르면 Plasma Rock Fragmentation System의 발파 암반파쇄 능력을 다이내마이트의 250g에 해당하였으며, 암반파쇄에 의한 소음이나 진동도 도심지나 인구밀집 지역에 사용하여도 좋은 수준이었다. Plasma Rock Fragmentation System에 의한 암반 파쇄시 음압과 진동 측정치를 그림 9에 나타내었다. 그림 9의 측정치는 위에서 부터 순서대로 음압, Radial, Transverse, Vertical 방향의 진동을 나타내고 있다. 발파지점으로 부터 10m에서의 음압은 80~90db 정도였으며, 세 성분을 합성한 진동치는 2~3mm/sec였다. 각 진동치를 Fourier Transformation한 결과가 그림 10에 도시되어 있으며, 그림 12와 같이 세 성분을 합한 주파수 성분을 그림 11의 화약발파시 진동치의 주파수 성분과 비교하면 Plasma Rock Fragmentation System에 의한 진동치가 고주파임을 알 수 있다. 그림 13은 거리에 따른 진동치를 나타내고 있는데, 이 또한 화약발파와 비교했을 때 거리에 따른 진동치의 감쇄가 훨씬 빨랐다. 건물이나 각 구조물의 고유진동수가 10~20Hz인 점

을 감안하면, Plasma Rock Fragmentation System을 사용한 암반파쇄는 진동 주파수가 높고 진동치의 거리에 따른 감쇄가 빨라서, 기존 건물이나 구조물에 거의 피해를 주지 않았다.

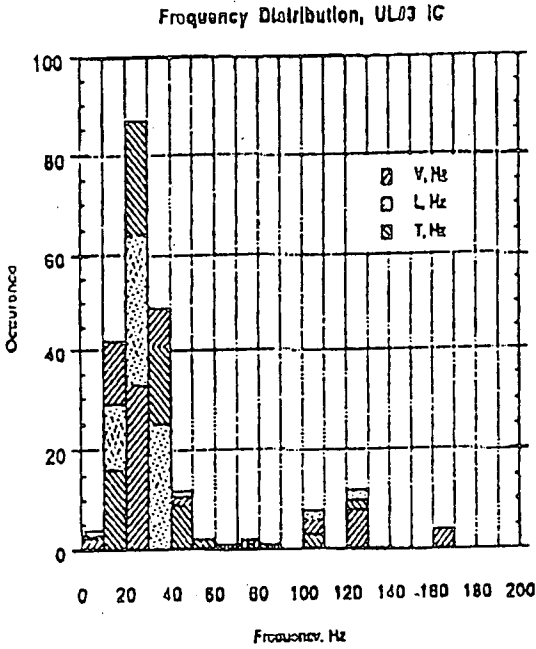


그림 9. 화약발파의 진동주파수 분포

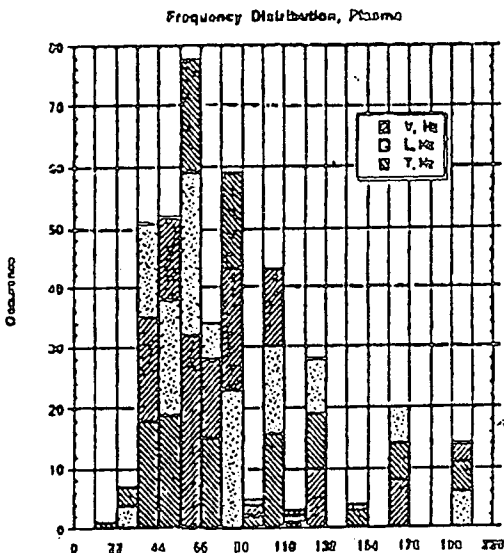


그림 10. 플라즈마발파의 진동주파수 분포

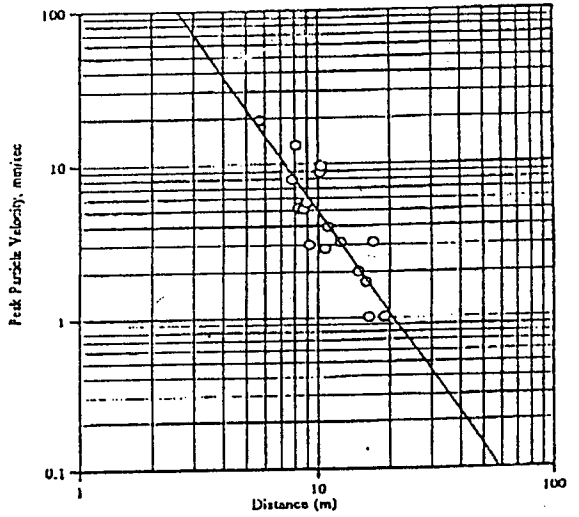


그림 11. 플라즈마발파의 거리에 따른 진동 감쇄

5. Conclusions

Plasma Rock Fragmentation System은 세계 최초로 상용화된 Plasma Blasting을 사용한 암반 파쇄 장비로서 그 시공성과 효용성은 여러 공사 현장에서 입증되고 있다. 이것은 발파 에너지를 대부분 테르미트법에 의한 화학에너지에서 도출하므로, 전적으로 전기에너지에 의존하는 기존의 Plasma Blasting 전원장치보다 크기와 용량을 현저히 줄이고, 대전하와 대용량의 전류를 흘릴 수 있는 스위치를 개발함으로써 가능하였다.

그러나, Plasma Rock Fragmentation System은 Blasting에 의해서 암반을 파쇄하므로 Blasting에 의한 소음과 진동을 줄이는데 한계가 있어서 드물게 소음과 진동이 환경기준치 이상으로 커지는 경우가 있으며, 경암이나 극경암 파쇄시 암반이 파쇄되지 않을 경우 전색물이 분출되면서 큰 소음이 발생하므로, 무거운 중량물로 발파공을 덮고 암반을 파쇄할 필요가 있다. 그리고, 알루미늄 분말과 물이 반응하여 수소 가스가 발생하고, 가끔 수소 가스가 다시 공기중의 산소와 연소하여 생기는 화염과 폭발은 안전상에 문제가 없다.

결론적으로, Plasma Rock Fragmentation

System은 화약으로 암반파쇄가 곤란할 경우 화약을 대신하여 효율적으로 암반을 파쇄할 수 있으며, 앞으로 Plasma Rock Fragmentation System에 의한 암반파쇄 시공법이 발전되면 각종 토목 및 건설현장에서 널리 사용되어질 것으로 기대된다.

References

Hamelin, M., et al. "Hard Rock Fragmentation with Pulsed Power", Proceedings of the 9th IEEE Pulsed Power Conference, Albuquerque, June 1993.

II. 프리스마 파암 기초이론

유창하 박사*

□ 플라즈마 파암작업의 특성

1. 플라즈마 파암과정에서 에너지 전달 및 암석파괴

- 전기에너지는 capacitor bank에 저장
- 에너지는 암석에 천공된 공내부에 넣은 소량의 전해질에 전기방전 형태로 전달
- 전기방전은 급속히 증기화되고 전해질을 분해하면서 고압의 plasma 발생
- 충격파 발생하고 암석의 균열 및 파괴 형성

2. 화약발파와 비교하여 플라즈마 파암작업의 주요 장점

- 유독성 가스와 같은 공해적인 부산물이 없다.
- 발파에 의한 손상의 조절면에서 유리하다.
- 진동발생 특성, 소음, 비산 등 발파공해면에서 유리하다.

3. 플라즈마 파암작업과 발파공해

- 발파재해의 주요원인 : 발파진동, 소음, 파

쇄된 암석의 비산

가. 지반진동과 환경영향

1) 진동의 수준

- 진동의 크기 표시 : 진동하는 매질의 변위, 속도, 가속도
- 진동량의 단위

성분	기본단위	기타
변위	m, cm, mm, μm	$\mu\text{m}=10^{-6}\text{m}=10^{-3}\text{mm}$
속도	m/sec, mm/sec	1kine=1cm/sec, in/sec
가속도	m/sec ² , cm/sec ²	1gal=1cm/sec ² 1g=980cm/sec ² =1000gal
주파수	Hz	1Hz=1cycles/sec(cps)

○ 구조물 영향평가를 위한 척도로는 속도를 이용하는 것이 합리적임.

2) 탁월주파수 대역

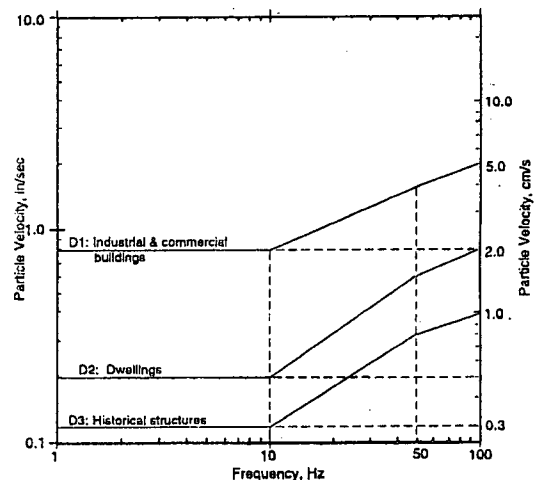
- 시간에 대한 진동파형을 주파수 대역으로 변환하였을 때 가장 우세한 대역
- 저주파 대역의 진동일수록 손상을 줄 확률이 높음

3) 진동지속시간

- 지속시간이 길수록 손상을 줄 확률이 높음

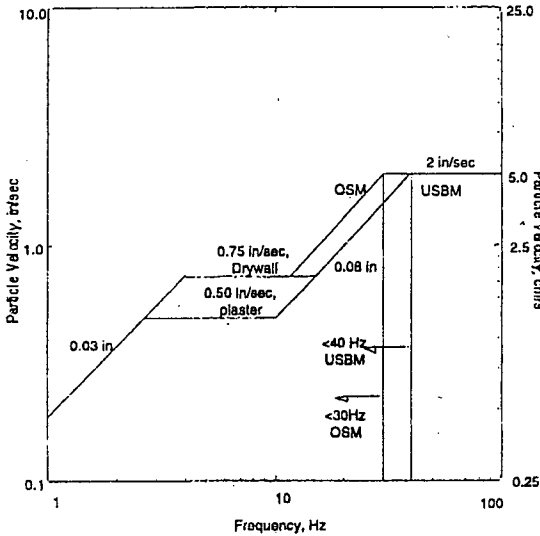
4) 영향평가 기준 예

- 주파수 대역에 따라 허용수준을 설정
- 독일 진동 허용기준(short term vibration, DIN 4150)



* 한국자원연구소

○ 미국 광무국 및 노천채광청의 허용수준 제한



○ 건설 및 교통진동과 관련하여 dB(V)로 규정된 환경부의 규제기준이 있음.

○ 국내 환경분쟁조정위원회에서 DIN Standard와 유사한 형태의 발파진동 허용기준안 준비 중임.

5) 플라즈마 파암작업시 진동의 수준

○ 계측사례

김포 검단 채석장

쌍용건설 미아리 정릉 스카이맨션 건설현장

계성제지 정릉 조합아파트 건설현장

삼성건설 북부간선도로 터널굴착 현장

○ 진동발생특성 및 수준 : 진동수준의 감쇠가 매우 크고 10m 거리에서 0.3cm/sec이하의 수준으로 조절이 가능

나. 소음과 환경영향

1) 소음수준과 구조물 영향

○ 미광무국(1980)의 연구결과에 의하면 시설물에 영향을 미치지 않는 안전한 폭풍압의 세기는 0.1Hz filter를 가진 측정계기를 사용할 경우 134dB, 2Hz filter를 가진 측정계기를 사용할 경우 133dB, 6Hz filter를 가진 측정계기

를 사용할 경우에는 129dB로 제안된 바 있다. 폭풍압의 영향은 구조물의 창문에 가장 먼저 나타나며 유리창이 파손되는 폭풍압 수준은 약 169dB이고 기와장이 떨어질 정도의 폭풍압 수준은 약 186dB이다.

2) 영향평가 기준 예

○ 국내 건설소음 규제기준(제32조, 제57조 관련), Leq dB(A)

시간별 대상지역	조 석	주 간	야 간
	05:00-08:00 18:00-22:00	08:00-18:00	22:00-05:00
주거지역, 녹지지역, 준도시지역중, 취락지구 및 운동, 휴양지구, 자연환경 보전지역, 학교, 병원, 공공도서관의 부지경계선으로 부터 50m이내 지역	65이하	70이하	55이하
상업지역, 공업지역, 농림지역, 준농림 지역 및 준도시지역중 취락지구 외의 지역, 미고시 지역	70이하	75이하	55이하

비고 : 1. 대상지역의 구분은 국토이용관리법에 의하여 도시지역은 도시계획법에 의한다.

2. 공사장 소음의 규제기준은 주간의 경우 소음 발생시간(작업시간)이 1일 2시간 미만 일 때는 +10dB, 2시간 이상 4시간 이하 일 때는 +5dB을 보정한다.

○ 발파폭압은 일반 소음과는 다른 충격압으로 일반 교통, 공장 등의 소음규제를 적용하기는 곤란하다.

○ 국내 환경분쟁조정위원회에서 발파작업시 소음에 대한 허용기준안 준비중임.

3) 플라즈마 파암작업시 소음의 수준

○ 소음의 수준은 작업장에서 사용되고 있는 천공장비와 같은 건설장비로 인한 background

수치보다 비슷하거나 약간 높은 수준

○ 계측사례 : 노천굴착작업시 차단막을 사용하지 않고, 파암작업을 하였을 때 주택가에서 A-weight로 10회 평균 69.5dB : 북부간선도로 터널굴착작업에 적용시 background 소음수준이 74-75dB이었을 때 1차 계측 평균 77.1dB, 2차 계측 약 79.8dB로 측정됨.

○ 작업장과 민가사이에 설치된 펜스에 의해서 약 15dB정도의 소음수준 경감 : 소음차단벽이나 매트를 사용하여 제어 용이.

다. 비산과 환경영향

○ 비산은 직접적인 구조물 손상이나 인명피해의 원인이 됨.

○ 화약발파시 비산의 주요 추진력은 폭발후 형성되는 가스압으로서 파쇄된 암석이 비산을 가속화 시키는 역할을 함.

○ 플라즈마 파암은 후가스가 발생하지 않으므로 비산은 거의 발생하지 않음.

라. 기타

○ 플라즈마 파암작업시 발생하는 진동의 주파

(계측사례)

Date/Time Long at 17:43:22 August 1, 1993
 Trigger Source Gca: 1.00 mm/s
 Range Gca: 364 mm/s
 Record Time 2.0 sec at 1024 sps
 Job Number 3

Serial Number BE5161 V 1.E4-1.E4 MiniMico Plus
 Battery Level 4.0 Vels
 Calibration October 10, 1993 by Instrument Inc.
 PDA Name G15161MP.DAQ

Notes
 Location: 78E 78C
 Client: 2/B
 User Name: K166A4
 General: PLASMA
 Extended Notes
 Pool Event Notes

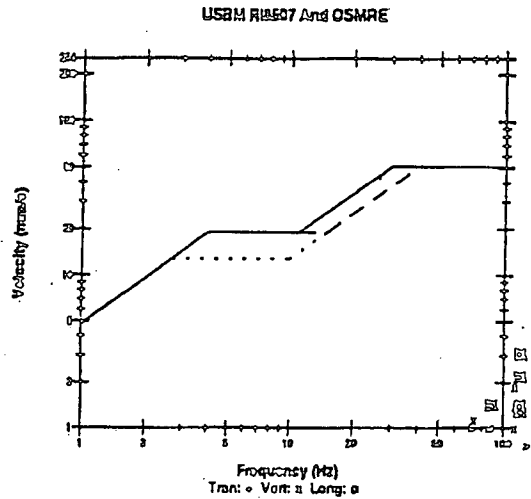
D = 12.4°
 7.5 MV

Microphone Uroar Weighing
 PSPL 120 dB(L) at 0.073 sec
 ZC Freq >100 Hz
 Channel Total Passes (Freq = 19.3 Hz Amp = 838 mv)

	Tran	Vct	Long	
PPV	1.52	2.03	3.05	mm/s
ZC Freq	>100	>100	>100	Hz
Time (Rel. to Trig)	0.026	0.009	0.003	sec
Peak Acceleration	0.103	0.172	0.212	g
Peak Displacement	0.00229	0.00223	0.00471	mm
Searchcut F ₀	Passes	Passes	Passes	

Peak Vector Sum 3.18 mm/s at 0.005 sec

Event Report



수특성은 비교적 고주파수 대역에 분포하는 것으로 나타나고 있다. 건물은 건물자체가 가진 고유진동수와 관련하여 저주파수 대역의 진동에 대해 손상 발생가능성이 증대하며 따라서 동일한 수준의 진동이더라도 더 유리하다.

○ 플라즈마 파암작업으로부터의 진동은 거리가 멀어짐에 따라 진동의 세기가 급격히 감소함을 보이므로 진동으로 인한 손상을 예방할 수 있는 안전거리 확보가 용이하다.

III. 시공특성 및 기존공법과의 비교 Plasma 破岩과 화약발파의 비교

허진 박사*

1. 火藥發破

火藥發破의 現象이라함은 可燃性 氣體에 산소가 混合되어 있거나 可燃性 液體 또는 固體가 熱分解할 때 尿酸素와 可燃物을 同時に 발화

* 대한화약기술학회

하는 不安定한 化合物의 一部에 熱이나 충격을 가하면 化學變化를 일으키면서 熱量 유리함과 동시에 多量의 氣體를 發生하며 국부적으로 급격한 壓力의 상승을 이룬다.

이때 발생된 高溫, 高壓의 活性化된 氣體의 作用으로 殘餘部分은 連續적으로 反應하여 힘을 放出하고 이것이 推進效果 또는 破壞效果를 發揮한다.

따라서 착압기로 굴착한 천공속에 폭약을 裝填하고 이를 點火 기폭시키면 孔內에 約 100,000kg/cm²의 壓力이 加해지고 이때의 溫度는 3,000° 以上에 達함으로써 岩破제가 일어난는 것이다. 이와 같은 폭약의 化學反應에는 酸化劑, 燃燒劑의 成分이 함유되어 있는 것이다.

화약류의 化學적 變化

구 분	폭발속도(m/sec)	비고
燃燒(combustion)	0.01	
爆燃(deflagration)	300~800	
爆發(explosion)	1,000~8,000	
爆破(detonation)	5,000~8,000	

2. Plasma 破碎

Plasma 破岩 現象은 천공내에 삽입된 전극 봉에 800MW에 해당하는 전력의 방전되면 전해액이 플라즈마 상태로 기체화하면서 0.5~1.0MS 동안 공내압력이 급격히 증가하여 충격파를 발생하여 주변의 암석을 파괴한다. 주변 암석의 강도와 발생된 응력수준에 따라 탄성적 혹은 소성적으로 변형되는 과정에서 암석은 균열을 생성하여 파괴효과를 나타내게 되는 점은 화약발파의 일시적 파쇄기구와 차이가 없다.

암석의 파쇄 즉 균열발생은 초기에 발생하는 충격파의 속도에 따르며 암석의 강도가 클수록

충격파의 속도가 높아야 하는데 화약은 4,000~6,000M/S, Plasma는 10,000M/S 이어서 Plasma의 경우 경암파쇄에 대응되는 속도이다.

화약에서는 그 에너지가 균열발생에 10~18% 가 이용되고 나머지는 가스압에 의해 균열이 생긴 암석괴를 이동 즉 비산시키는 역할을 한다.

Plasma파암은 충격파 발생이후 에너지가 소멸됨으로써 폭약에서와 같은 비산에 운동이 이루어지지 않는다.

환경공해 면에서 Plasma에서는 수증기가 발생하며 전해액에 혼합된 소량의 무기질 반응물이 생성될 뿐이다.

노천에서 암석파편의 비산이 전혀없음으로 인하여 별도의 보안책이 필요하지 않으며 발생하는 지반진동은 구 반응특성상 고주파영역의 진동파이기 때문에 가능하여진다. 터널에서의 Plasma 적용시 발생하는 소음도 같은 논리에서 그 지속 시간이 화약에 비하여 짧기 때문에 인체가 수인할 수 있는 한도가 높을 수밖에 없다. 이와같은 발생한 지반진동의 주파수는 저주파의 영역이 없음으로 15~20Hz에서 일어날 수 있는 건축물의 공진현상은 전혀 관련이 없다.

Plasma 破碎와 火藥發破에 對하여 以上과 같이 比較하였으나 이는 用途 즉 工法適用에 따라 약간의 長短點이 있음으로 한 現場에서도 兩者를 獨自적으로 사용할 수 있고 또 경우에 따라서는 한 現場에서는 場所를 區分하여 共用할 수 있는 것으로 思料되나이다.

끝으로 진동 騒音 節減에 있어서는 Plasma가 火藥에 比하여 有利한것만은 公知의 事實이라 할 수 있다.

(시 공 특 성)

1. 장비의 안전성

- 간편 조작
- 안전한 장비구조

- 취급용이(화학 취급허가 및 자격 불필요)

2. 환경 친화성

- 저진동, 저소음
- 무비산, 비화약성
- 유해가스 발생이 극히 적음
- 전천후 시공가능

3. 시공성 양호

- 계획파쇄 가능
- 수평, 수직공 시공가능
- 미숙련공 작업가능

4. 경제성 확인

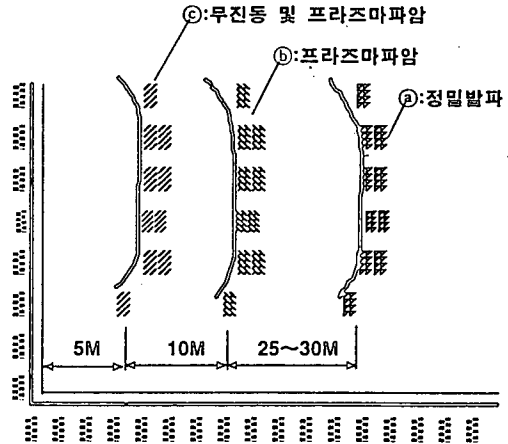
- 기존공법보다 20~30% 절감효과
- 기존공법보다 1일 파암량 증대

〈적용 범위 기준〉

실제 시공현장에서의 프라즈마 파쇄기술의 적용범위 기준

공사장의 굴착 대상 총면적을 100%로 볼 때

인접 구조물로부터 파쇄지점간의 거리에 따라 환경규제치(일반주거지역 경우 0.3kine, 70dB(A) 이하)를 고려하여 파쇄작업 특성별 적용영역을 보면 다음과 같다.(ex : 공사장 실례)



- ① 내부지역(화약발파 지역 : 60%)
- ② 중간지역(프라즈마파쇄 지역 : 30%)
 - ④ 방법대비 : 非화약방법, 저진동, 저소음, 안정성 특성
 - ⑤ 방법대비 : 無발파지역적용, 시공성양호, 경제적 특성
- ③ 외부지역(유압 Jack지역 : 10%)

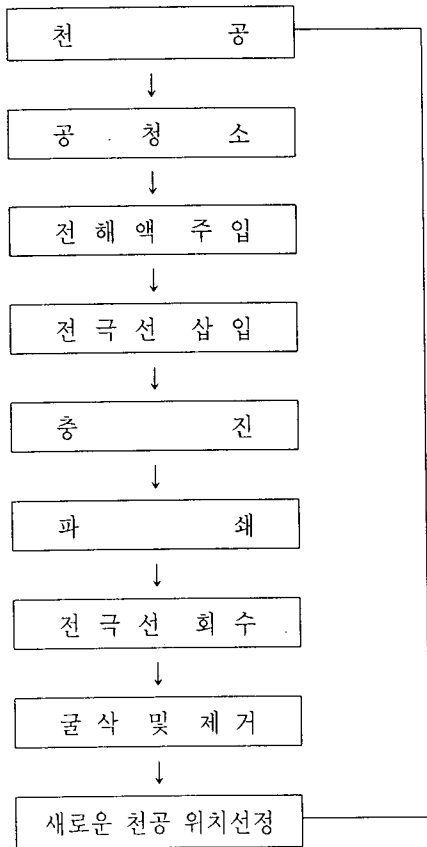
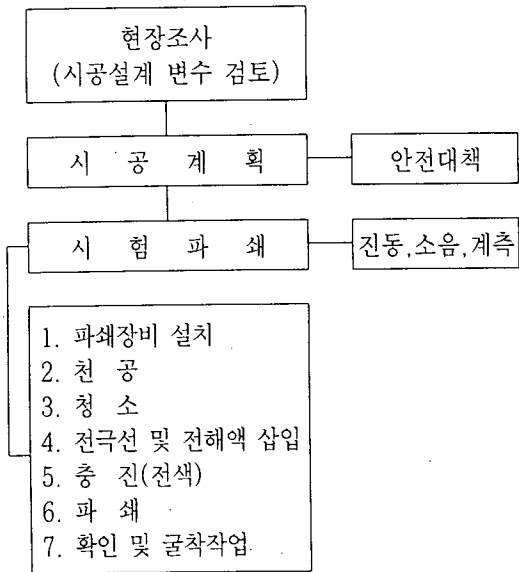
〈프라즈마공법과 기존공법의 비교〉

* 기준 : 1, 2차파쇄, 유압드릴 1대

내용 \ 구분	가스압 이용	팽창성 파쇄제	유압 JACK	프라즈마 파쇄기
1. 제품종류 (제작사)	CARDOX (영 국)	비폭성 파쇄제(상용) BRISTAR(일본)	K.R.S/H.R.S(한국) S.R.S(러시아)	PRF-500(수산중공업)
2. 파쇄원리	가스압 (물리적 방법)	경화 팽창력 (화학적 방법)	유압팽창 이용 (기계적 방법)	프라즈마 충격파 이용 (전기적 방법)
3. 파쇄시간	즉 시	12~72Hr/회	2~4min/회	즉 시(3 μ s)
4. 화약류사용 허가 및 자격	불 필 요	불 필 요	불 필 요	불 필 요
5. 복합소음 (1,2차파쇄)	높 음	중 간	아 주 높 음	낮 음
6. 시공성	보통암	40m ³	30m ³	200m ³
	경 암	불 가	불 가	100m ³

* 상기 시공 물량은 현장 여건에 따라 변동이 될 수 있음.

〈시공 공정도〉



〈프리즈마파암 작업조 구성〉

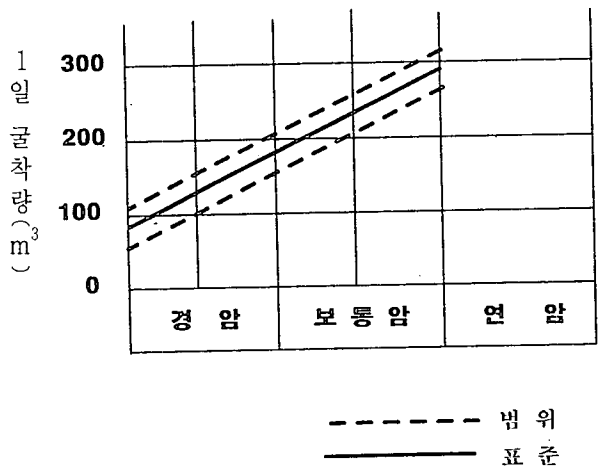
구성	장비구성			인원구성					
	장비명	기종	대수	팀장	운전	파암	착암	보조	
천공	φ48~51MM 유압드릴, 각종천공장비	SHCD-700	1				1	1	
1차 파쇄	프리즈마 파암기	PRF-500	1	1		1		1	
2차파쇄	B/H(02)	0.3m ³	1		1				
3차파쇄	브레이크	0.6~1.0m ³	1		1				
	백호	0.6m ³	1		1				
계					1	3	1	1	2

* 기종란은 표준사양임.

* 백호, 브레이크는 필요에 따라 병용 가능함.

〈시공능력〉

시공능력 표준(파암량 : 5,000m³/1개월/1조)



(1일 굴착량과 암질과의 상호 관계표)

〈천공경 및 천공장〉

〈적용가, 불가 범위〉

천공경, 천공장과 BENCH 높이(기준)

BENCH 상태	적 요	천공경 (MM)	천공장 (MM)	파암깊이 (MM)
1. 자유면	마무리, 터파기, 법면정리	Ø48 ~51	1,200~1,500	1,200~1,500이상
2. 자유면이상 (H=2.5M)	연암~중경암	Ø48 ~51	1,500~2,000	1,500~2,000이상
3. 자유면이상 (H=2.0M)	중경암~경암	Ø48 ~51	1,500~2,000	1,500~2,000이상
4. 자유면이상 (H=2.0M)	경 암	Ø48 ~51	1,200~1,800	1,200~1,800이상

1. 프라즈마파쇄 작업의 적용 가능 범위

- ① 기초 터파기 공사(예 : 도심지 재개발 지역)
- ② 옥석 파쇄(예 : 암괴의 2차 파쇄)
- ③ Trench 굴착(예 : Open cut trenching)
- ④ Tunnel 굴착(예 : 환경 민감 지역)
- ⑤ 특수시설보호지역(예 : 빌딩, 가스관, 수도관, 통신구 등)
- ⑥ 토목 및 건축용 석재생산(예 : 방향성 파쇄 기능을 가진 다단직렬동시파쇄 시스템 개발완료시 가능)

〈천공간격 및 저항선〉

A : 저항선, B : 간격

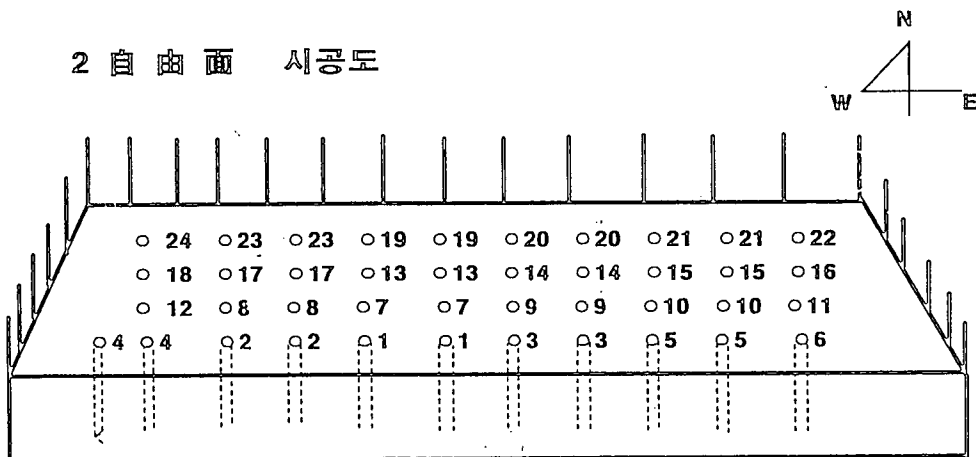
암 종류	탄성파 속도(VP)	간격(A×Bm)
1. 연 암	2.5Km/s이하	1.0×1.0m
2. 보통암	2.5~4.5Km/s	0.8×0.8m
3. 경 암	3.5~4.8Km/s	0.7×0.7m
4. 극경암	4.8Km/s 이상	0.5×0.5m

2. 프라즈마파쇄 작업의 적용 불가능 범위

- ① 완전 무진동, 무소음을 요건으로 하는 작업지역
- ② 수중공사
- ③ 대량 파쇄 목적의 채석장
- ④ 철골 구조물 파쇄작업

〈시공 패턴도〉

2 自由面 시공도

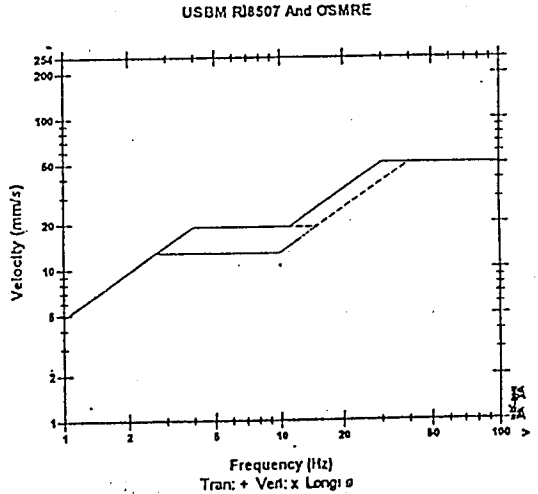
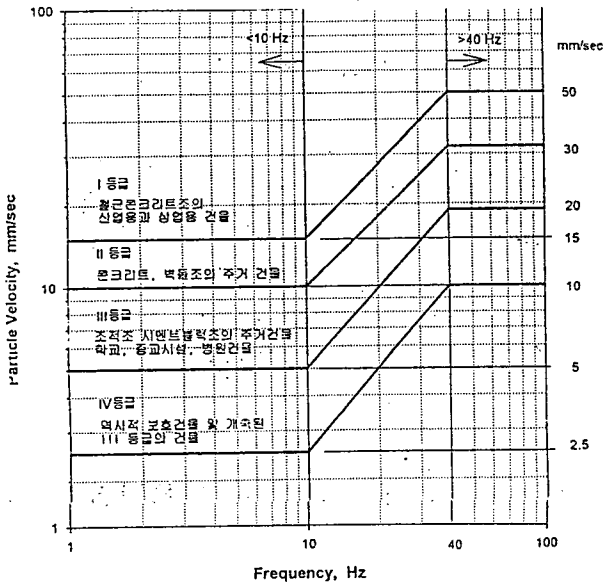


ENCH에서의 PLASMA 파암순서

〈발파 진동 허용 기준〉

Event Report

Serial Number BE5207 V 3.11-3.11 MiniMate Plus
 Battery Level 6.5 Volts
 Calibration March 28, 1997 by Instanfel Inc.
 File Name G2076LU9.8M0



〈환경 영향치 측정(진동)〉

〈 측정거리 : 6.0 m〉

〈진동 및 소음 측정〉

Date/Time Long at 14:50:46 August 29, 1997
 Trigger Source Geol 1.00 mm/s
 Range Geol 254 mm/s
 Record Time 3.0 sec at 1024 sps
 Job Number: 1

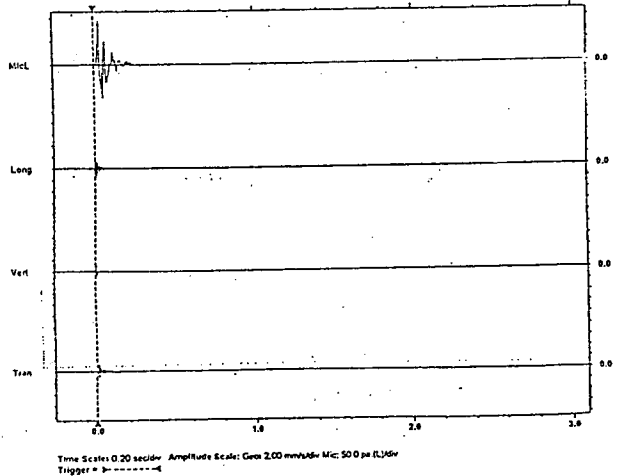
Notes
 Location:
 Client:
 User Name:
 General:

Post Event Notes

Microphone Linear Weighting
 PSPL 133 dB[L] at 0.030 sec
 ZC Freq 18 Hz
 Channel Test Passed (Freq = 20.1 Hz Amp = 741 mv)

	Tran	Vert	Long	
PPV	1.40	1.14	1.40	mm/s
ZC Freq	>100	>100	>100	Hz
Time (Rel. to Trig)	0.009	0.005	0.008	sec
Peak Acceleration	0.146	0.159	0.199	g
Peak Displacement	0.00155	0.00056	0.00074	mm
Sensorcheck™	Passed	Passed	Passed	

Peak Vector Sum 1.73 mm/s at 0.010 sec



Time Scale: 0.20 sec/div Amplitude Scale: Geol 200 mm/s/Div Mic: 50.0 mv/Div
 Trigger = -----