

급팽창 금속혼합물을 이용한 나노플라즈마 바위 파쇄공법에 관한 연구

김성국¹⁾, 안명석²⁾, 조명찬³⁾

A Study on the Nano-Plasma Rock Breaking Blasting Method Using Rapidly Expansive Metal Mixture

Sung-Kook Kim, Myung-Seog Ahn and Myung-Chan Cho

Abstract : In the past, explosives like dynamite was used to blast rock. However, today it is difficult to use explosives in urban blastinglike excavation for subway, building, and housing land. According to Korea Department of Construction and Transportation's proposal for blasting design manual and test blasting, from TYPE I blasting to TYPE IV blasting are recommended when we determine 0.3cm/sec(centisec) as a maximum allowable ground vibration with a distance between 25m ~ 120m from structures. This article was written to introduce one of TYPE I (rock blasting within 25m from structures) blasting method, Nano-Plasma blasting method. When Nano-Plasma blasting method is applied in urban blasting job, ground vibration (15m away from blasting point) is expected 0.1cm/sec, which is only half of a ground vibration when low ground vibration blasting method is applied. By this unique characteristic, Nano -Plasma blasting method is epochal urban blasting technique.

Key words : big rock, dynamite, explosion, urban rock, Nano-Plasma

초 록 : 옛날에는 거대한 바위를 제거하기 위해서는 다이나마이트 등의 폭약을 사용하여 폭파개념의 발파를 해 왔다. 그러나 도심지에서 지하철굴착, 건물기초굴착, 택지조성 등을 위해서는 폭파개념의 굴착은 곤란하다. 건설교통부 암발파설계 및 시험발파 잠정지침(안)에서는 0.3cm/sec(센티세크)를 진동안전기준치로 하였을때 25~120m 이격거리에서는 TYPE I의 암파쇄굴착공법에서 TYPE IV의 진동제어중규모 발파공법을 권장하고 있다. 본 논문은 25m이내 지역의 최근접 암파쇄굴착공법(TYPE I)적용 최적공법인 나노플라즈마 공법을 소개하고자 한다. 나노플라즈마 공법을 적용하여 도심지 바위를 파쇄할 때 15m거리에서 기존의 미진동발파공법의 절반 진동수준인 0.1cm/sec가 예상되는 획기적인 공법이다.

핵심어 : 거대한 바위, 다이나마이트, 폭파, 도심지 바위, 나노플라즈마

1. 서 론

산업발달과 더불어 지하공간개발, 도로, 터널, 건물 터파기 등의 토목 및 건설 분야가 활성화됨에 따라 필연적으로 수반되는 것이 암반굴착작업이다.

지금까지의 암반굴착공법은 폭약을 이용한 발파공법 및 장비를 이용한 할암공법에 의존해왔다. 그러나, 폭약에 의한 발파작업의 경우 필연적으로 수

반되는 공해요인으로서는 비산, 지반진동, 폭풍압 등이 있다.¹⁾ 이들 공해요인은 암반굴착에 많은 제약이 따라왔으며, 특히 우리나라의 건설표준품셈의 암분류는 많은 문제점을 내포²⁾하고 있으나 이를 보완, 고려하지 않은 무리한 발파작업 강행으로 인한 구조물의 물리적인 피해 및 민원발생에 따라 직접적인 손해배상이나 공사중단에 따른 공기지연으로 막대한 경제적 손실을 초래하고 있다.³⁾ 또한, 현장적용 제안 충격진동기준 0.5cm/sec, 음압기준 120dB(L), 소음기준 85dB(A)⁴⁾를 적용할 때 유압력을 이용한 할암공법은 많은 비용과 시간 소요 및 암석강도 증가에 따라 경제성 및 시공성이 극히 감소한다.

본 급팽창 금속혼합물을 이용한 나노플라즈마

1) (주)유림소재 플라즈마사업부 부장
2) 동서대학교 응용생명공학부 겸임교수
3) 동서대학교 응용생명공학부 전임교수
접수일 : 2005년 9월 16일

바위파쇄 공법은 폭약으로 인한 발파공해를 극소화 하였으며, 장비를 이용한 할암 공법에 비교될 수 없을 만큼 뛰어난 시공능률을 가진 신공법이다. 또한, FTA분석법에서 발파사고 원인은 비석·낙석사고가 45.7%였으며 그 다음이 장전작업중·소각처리중·누전·낙뢰 8.6% 등이었다.⁵⁾ 본 나노플라즈마 공법은 고압의 전기에너지나 1000℃ 이상의 온도에서 반응하며, 반응이 시작되어도 응압을 받지 않는 대기조건에서는 폭연이 되지 않기 때문에 취급상 매우 높은 안전성을 확보하고 있으며, 응압을 받게되는 암반 내에서만 순간적인 고열에 의해 급팽창되고 즉시 감압·소진되므로 터널발파시 주 주파수 30~120Hz 분포⁶⁾를 대폭 줄여줌으로써 진동·소음을 극소화할 수 있는 신개념의 바위파쇄공법이다.

2. 이 론

2.1 플라즈마의 정의⁷⁾

플라즈마(plasma)는 어떤 물질이 초고온(20,000℃)의 상태에 이르렀을때 양전하와 음전하를 띤 입자와 중성입자로 구성된 기체로 정의될 수 있다. 그리고 플라즈마는 고체, 액체, 기체와 구분되는 제4의 물질상태라 할 수 있으며, 이때 물질은 원자간의 결합이 끊어져 이온과 전자로 분리된다. 보통의 물질이 고온으로 가열되면 고체에서 액체, 액체에서 기체 그리고, 기체에서 플라즈마로의 상변화가 일어나게 된다.

사실상 플라즈마는 가장 혼한 물질의 상태(우주의 99%가 플라즈마상태로 존재)이다. 또한, 가장 에너지가 높은 상태이기도 하다. 고체에서 액체 또는 액체에서 기체로 변환될 때 필요한 에너지는 10^2 eV인데 반해 기체에서 플라즈마로의 변환은

1-30 eV를 요구한다. 대개 이온화보다 높은 에너지가 기체원자에 가해지면 이온화가 일어나면서 플라즈마가 형성된다. 이온과 전자가 합쳐져서 중성기체로 변하는 과정도 동시에 일어나고 이 두과정의 평형을 이루면 안정된 플라즈마가 만들어진다. 충분한 에너지가 액체나 고체에 가해지는 경우에도 중기화와 이온화가 일어나 플라즈마가 만들어지기도 한다. 플라즈마는 반응성이 크고 에너지가 지속적으로 가해지지 않는한 비교적 짧은 라이프타임(lifetime)을 갖는다.

2.2 나노플라즈마 바위파쇄 공법개요

우리나라에서 전통적으로 사용해 왔던 제2세대의 젤라틴 다이내마이트 폭약은 경제구조와 안전의식 및 생활환경의 급변으로 제5세대의 에멀전폭약으로 급변, 대체되고 있다. 또한 벌크에멀전폭약의 제조 및 사용기술이 실용화됨으로써⁸⁾ 새로운 발파기술의 시대를 매우 빠르게 맞이하고 있다. 이러한 때에 새로운 암굴착 기술의 혁명이라고 할 수 있는 화학성분을 사용하지 않은 제6세대의 비화학 암굴착 물질이 개발되었으며 이를 C.S. KIM CAPSULE이라고 명명하였으며 이의 굴착공법을 나노플라즈마 바위파쇄공법이라고 명명하였다.

C.S.KIM capsule의 개요

가. 물질의 조성

C.S.KIM CAPSULE의 내부물질은 금속과 금속염으로 이루어진 위험물 제1류와 2류의 혼합물이다. 화학조성은 가연성고체 금속과 산화성고체 물질인⁹⁾ 질산금속염 및 산화금속염을 분말로 하여 적량 배합하고 Fig. 1과 같이 발화장치가 설치된 플라스틱 케이스에 삽입하고 밀폐하여 제작되어 있다.

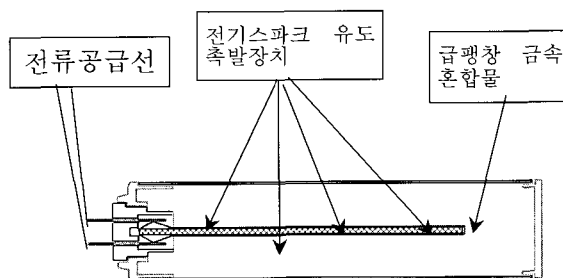
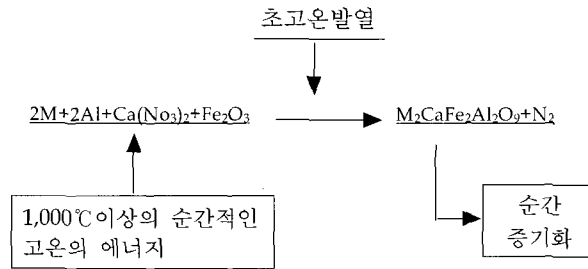


Fig. 1. Structure of C.S.KIM capsule.

나. 화학반응식



나노플라즈마공법의 발파이론¹⁰⁾

Fig. 2와 Fig. 3과 같은 대전력 공급장치로부터 Fig. 1과 같은 C.S.Kim capsule 내부에 다중 전기 스파크 유도 촉발장치가 대전류를 공급 받으면 다중 점화식 전극에서 발생한 전기불꽃(spark)이 급팽창 금속혼합물(전해질)에 전기적 충격을 가함으로서 급팽창 금속혼합물이 반응하여 초고온 초고압의 열팽창 에너지를 발생시킨다. 이때 순간적으로 형성된 플라즈마는 나노상태(Nano :10¹²)가 된다. 대기압상태의 C.S.Kim capsule 내의 금속혼합물은 밀폐된 공간에서 약1,000°C 이상의 순간적인 열에너지에 의해 열화학반응을 일으켜 급격히 20,000°C이상의 초고온이 되어 상변화(phase transition)가 일어나면서 약20,000atm 이상의 초고압의 열팽창 에너지가 C.S.KIM capsule 축을 중심으로 동심원적인 충격파를 발생시켜 Fig. 4와 같이 절취 대상 암반을 파쇄하게 된다.

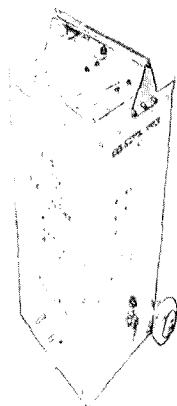


Fig. 2. Electric spark supplier.

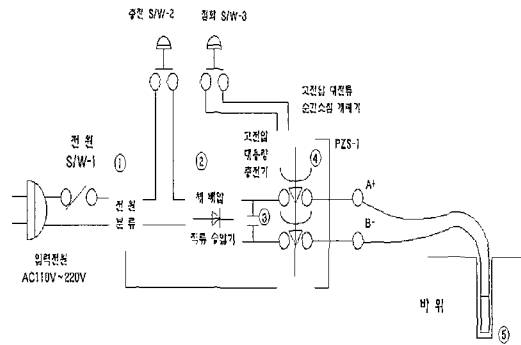


Fig. 3. Schematic diagram of the supplier.

이때 고체금속의 팽창반응으로 초기 순간 최대 압력은 약20,000atm 이상의 초고압이 발생하여 파암공 내벽에 균등한 팽창 압력을 가하게 된다. 이 압력으로 capsule과 전방 자유면사이의 암반은 전방과 상부 자유면의 영향으로 인장력과 전단력이 작용하고 capsule 후방의 암반은 주로 압축력을 받게 된다. 암석은 압축력 대비 인장력과 전단력에 약하므로 capsule과 전방 자유면사이의 암반에 파쇄균열이 발생하여 Fig. 4와 같이 절취대상암반을 파쇄하는 원리이다.

절취대상 암반의 파쇄와 동시에 파암공내 압력의 급감과 전해질 반응시 가스압을 발생시키지 않아 대구지역 인근의 대표적인 암석인 저색실트스톤과 회색셰일 분포¹¹⁾ 지역에는 비산방지에 탁월하며, 일반폭약 대비 낮은 진동발생과 비산 및 폭음을 최소화 할 수 있는 획기적인 바위파쇄 공법이다.

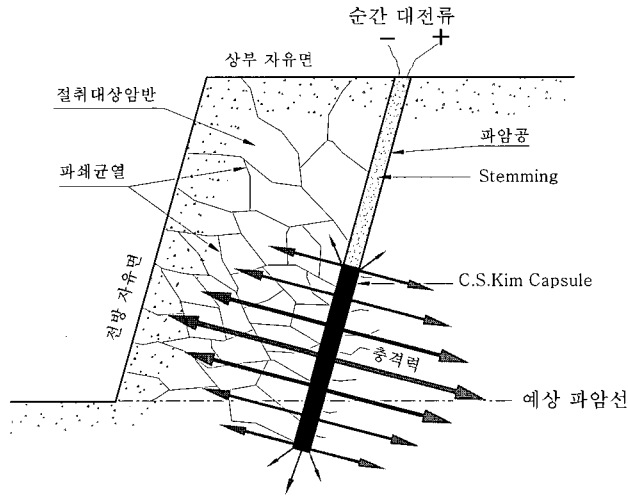


Fig. 4. Rock splitting principle of Nano Plasma.

2.3 나노플라즈마 공법의 특징¹²⁾

환경성 및 물질 안정성

가. 낙추시험 안전성

외부 충격력에 대한 안전성을 비교하기 위해 전해질과 미진동파쇄기의 분말에 대해 낙추 시험을 Fig. 5와 Table 1과 같이 실시하였다.

Table 1. Relative sensitivity to heights(%)

낙추 높이 (cm)	20	23	25	30	65	70	75	85	90	100
C.S.KIM CAPSULE	0	0	0	0	0	20	40	50	70	100

전해질의 발화는 약70cm 높이에서부터 시작하여 50%가되는 높이는 약 85cm이며, 100%가 되는 높이는 약 100cm이었다. 그리고 미진동파쇄기의 경우는 약 23cm 높이에서 80%가 되었으며 약 30cm 높이에서는 100%가 되었다.

따라서 나노플라즈마 전해질은 낙추감도가 100cm 로써 미진동 파쇄기 장약화약의 낙추감도 30cm에 비해 매우 안전함이 증명되었다. 그러므로 외부 충격력에 대한 저항이 매우 우수한 특성을 가진 물질이다.

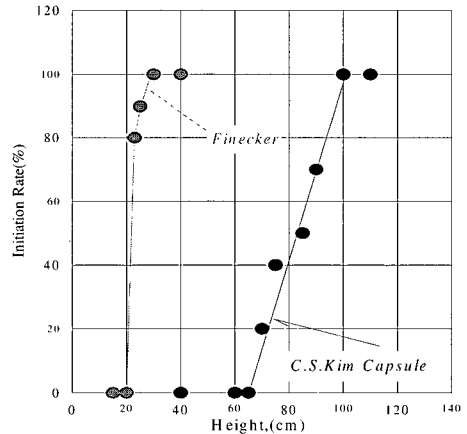


Fig. 5. Relative sensitivity to drop impact test.

나. 열감도 및 인화성 시험

C.S.KIM capsule의 열감도를 알아보기 위하여 0.5g을 도자기 접시에 담아 전기로에 넣고 섭씨 1,200°C 까지 정속가열 하였다. capsule은 1,200°C 까지 발화하지 않고 색깔도 변하지 않았으며, 약간의 감량만이 발생하였다.

C.S.KIM capsule 반응시 인접해 있는 다른 C.S.KIM capsule에의 인화성 여부를 알아보기 위해서 Fig. 6과 같이 시험 재료를 배열 하였다.

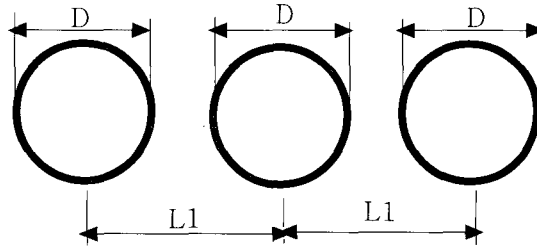


Fig. 6. Arrangement for gap sensitivity test.

주 반응하는 "B" 시료를 중심으로 하여 좌우로 1 개씩을 배열하였다. 배열 간격은 "L1"으로서 동일 하며 이들은 시료의 직경 "D"를 기준으로 1D(접촉 상태), 1.5D(직경의 0.5배 간격) 및 2D(직경과 같은 간격)의 3가지 경우로 하였다.

시험결과 C.S.KIM capsule은 2D, 1.5D 그리고 1D(접촉상태) 모두에서 인접Capsule로 인화되지 않았다. 따라서, C.S.KIM capsule의 인화위협성(폭약의 순폭시험에 해당함)은 전연 없으므로 감도와 인화성은 매우 안전한 것으로 판명되었다.

다. 비산 시험

발파시 파쇄된 암석이 불규칙하게 모암에서 튀어나오는 현상을 비산이라 하며, 주변 구조물 및 인명을 살상 할 수 있어 사실상 암파쇄작업시(발파시)가장 위험한 발파 공해에 속한다.

본 비산시험에 사용된 재료는 에멀전류 폭약과 C.S.KIM capsule을 아래의 시험조건 Table 2와 같이 시험을 실시하고 결과를 집계하였다. 천공 패턴은 약간의 교차절리를 내재하고 있는 보통암(일축 압축강도 약1,100kg/cm²) 정도의 암반에서 상기의 시험조건으로 천공을 실시하였다. 계단높이는 약

4.5m이고 공저가 구속되지 않고 개방된 상태이어서 장약 및 장전실이 전방 자유면상에 위치하며 장약장 중심과 낙하점과의 수직 고저차는 에멀전류 폭약의 경우 3.22m, C.S.KIM capsule의 경우는 약 3.18m 이다.

비산 거리는 파쇄암의 직경이 약10cm정도 되는 암석이 비산한 거리를 측정 하였다. 에멀전류 폭약에 의한 비산거리는 평균 약25.5m, C.S.KIM capsule은 약6.6m로써 C.S.KIM capsule의 파암에 의한 비산거리는 에멀전류 폭약의 발파에 의한 비산거리보다 약4배정도 짧은 것으로 확인되었다.

라. 수중 사용시 환경성

대기중에서 C.S.KIM capsule은 화학반응에 의하여 발생될 수 있는 가스량은 5% 이하로 극히 적으며, 가스의 종류는 N₂, O₂ 로서 인체 및 주위환경에 유해하지 않으므로 선진국에서는 친환경적인 물질로 많은 관심을 끌고 있다.

또한 C.S.KIM capsule을 수중에서 사용할때 수중 환경에의 영향을 관찰하기 위하여 Fig. 7과 같이 수중에서 발화 시험을 실시하였다. 시험 결과

Table 2. Result of the test

사용재료	공당 장약량 (kg)	천공경 (mm)	계단 높이 H(m)	천공장 L(m)	저항선 B(m)	공간격 S(m)	누두공 반경 R(m)	비 장약량 (kg/m ²)	낙하점고저 차 h(m)	직경/길이 (mm/cm)
에멀전폭약	0.375	45	4.5	1.5	0.45	2.0	0.9	1.2195	3.22	32/29.5
C.S.KIM Capsule	0.500	45	4.5	1.5	0.45	2.0	0.9	1.9756	3.18	40/36.0

반응시 약간의 불꽃과 미량의 가스에 의한 거품이 발생 하였을 뿐, 일반 폭약류 제품을 사용할 때와 같은 대량의 강한 가스압에 의한 물기둥은 관찰되지 않았다. capsule을 수중 공사에 사용시 주변의 환경에 영향을 미치지 않고 소음 및 폭발 물기둥에 의한 위험을 느끼지 않는 암파쇄 공사를 수행할 수 있다.

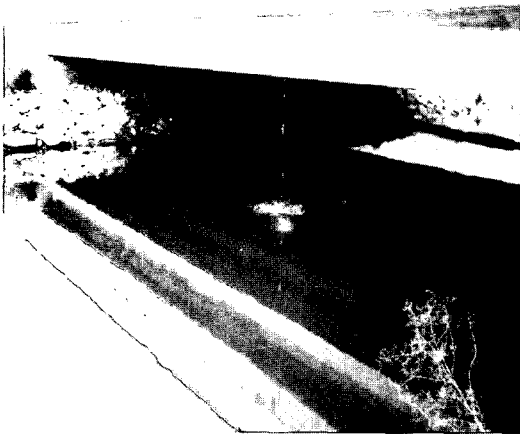


Fig. 7. Underwater testing.

다. 나노프라즈마의 비산 및 진동감쇄 특성

일반 화약류는 기폭과 동시에 발생하는 고열과 충격파로 인해 암반이 1차 파쇄되며 바로 이어서 발생한 가스 팽창압에 의해 2차 파쇄 및 비산먼지와 비석이 발생하게 된다.

Fig. 8은 C.S.Kim capsule과 일반화약류의 팽창 압력변화를 나타내고 있다. C.S.Kim capsule은

반응 초기에 최대압력(Pcmax)은 일반화약류의 기폭 초기 최대압력(Pemax)보다 높게 발생되지만 목적물 파쇄와 동시에 반응압력은 급격하게 감소하는데 비해 일반화약류의 압력은 완만하게 감소하는 경향을 보인다. 그러므로 목적물 파쇄 후 일정한 압력(Po)을 나타내는 영향범위가 일반화약류(Re) 대비 C.S.Kim capsule(Rc)이 좁기때문에 미진동파쇄기나 일반화약류에서 발생 할 수 있는 가스압에 의한 비석발생 위험은 극히 낮아 시공의 안전성을 충분히 확보할 수 있다.

본 연구에 사용되는 C.S.KIM capsule내의 전해질은 밀폐된 천공내에서 높은 전기에너지를 공급받아 순간반응으로 고체 팽창하여 목적하는 암반을 파쇄한 후 즉시 감압·소진되기 때문에 낮은 진동이 발생되고 발생한 진동은 심부경암층에서의 감쇠현상¹³⁾처럼 진원과 근거리에서 빠르게 소멸되어 원거리까지 전파되지 않기 때문에 지반진동의 공해가 극소화되는 특징을 지닌다.

에멀전 폭약에 의한 암반파쇄시 감쇠지수는 -1.50~-1.85¹⁴⁾인데 비하여, C.S.KIM capsule의 감쇠지수는 -1.45~-2.23으로써 진동감쇄폭이 매우 크며, 진동소진거리가 매우 짧기 때문에 기존 구조물에 근접시공이 가능하다.

Fig. 9¹⁵⁾에 의하면 C.S.KIM capsule의 진동주파수는 기존의 화약류에서 발생하는 진동주파수 및 1~100Hz인 보통주파수¹⁶⁾에 비하여 높은 주파수 대역을 이룬다. 따라서, 일반 건축구조물의 고유진동수대역이 저주파¹⁷⁾임을 고려할 때, 화약과 동일 진동의 크기에서도 C.S.KIM capsule을 사용할 때 구조물에 더욱 안전함을 알 수 있다.

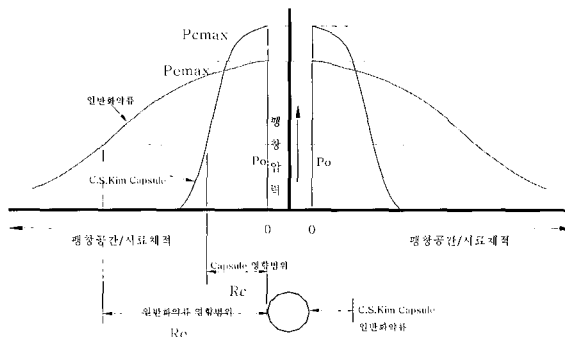
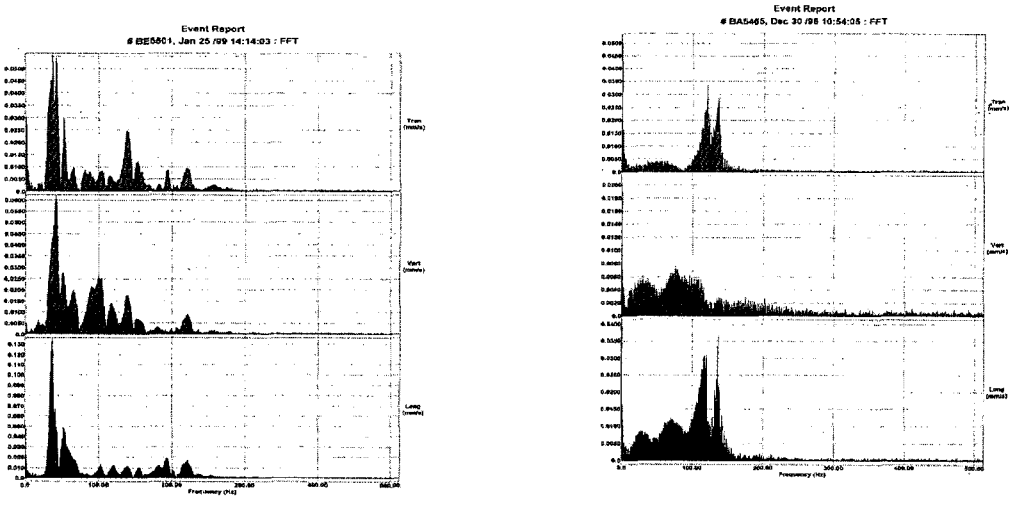


Fig. 8. Expansion pressure of C.S.KIM capsule vs. of industrial explosives.



(a) FFT analysis graph of blasting method

(b) FFT analysis graph of Nano Plasma

Fig. 9. Ground vibration analysis graphs.

나노플라즈마의 시공성

가. 나노플라즈마와 일반플라즈마공법과의 비교

C.S. KIM 캡슐은 수산 플라즈마로 대표되는 기존 플라즈마의 급격한 온도 상승에 의한 증기 팽창압이 아닌 금속 분말의 고온에 의한 금속 증발 열에 의한 금속 팽창압력으로 암반을 파쇄한다. 따라서 기존 플라즈마가 경암에 적용될 수 없었던 단점을 해결하였다.

Fig. 10은 기존 플라즈마와 C.S.KIM 캡슐의 반응 후 시간 경과에 따른 팽창압력 비교표이다. 또한, 기존 플라즈마는 고압(약8,000~9,000V)으로 인한 잔류전류 위험과 저시공성(1회파암 3공이하 작업), 그리고 제품특성상 장기 보관이 안된다는 단점을 가지고 있었다. 하지만 C.S.KIM capsule은 플라즈마 반응 전압을 4,000V이하로 낮추어 작업시 잔류전류의 위험성을 제거하였으며, 또한 1회 동시 파암 공수를 10공으로 증대시켜 시공성을 향상시켰으며, 향후 장공파암 및 대량파암공법을 개발중이다. 그리고 제품을 카트리지 형식으로 제작하여 제품의 유효기간을 1일에서 1년으로 대폭 증가시켰

으며 제품의 취급성 또한 증대 시켰다. 아래에 기존 플라즈마공법과 나노 플라즈마공법을 Table 3에 비교하였다.

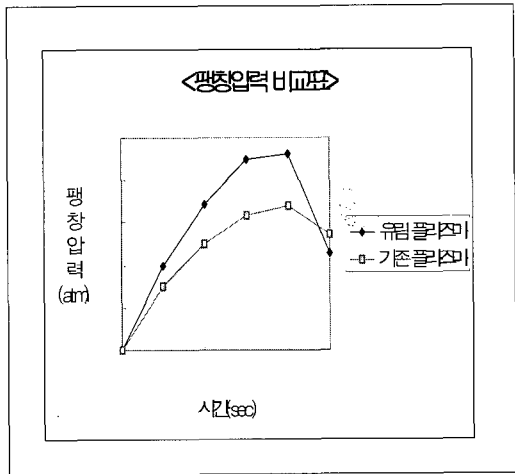


Fig. 10. Basic plasma vs. Nano Plasma.

Table 3. Comparison of Nano Plasma and basic plasma

		기존플라즈마 공법	나노플라즈마 공법
성능	동시 파암공수	4공 이하	소형파암기: 4공 중형파암기: 6공 이하 대형파암기: 12공 이하
	공당 파암력조절	파암규모에따른 조절 불가능	파암규모에따라 다양하게 조절가능
		약량 증가와 위력차가 완만	약량의 증가에따라 자유롭게 조절됨
장비의 안정성		최종 파암스위치를 눌러 암반을 파쇄 후에도 일정시간 7,000V-9,000V 고압이 방출되므로 작업자의 안전문제 상존.	반응정압이 4,000V이하로써 파암 즉시 모든 전력이 제거되어 작업자의 안전성이 확보됨.
특허사항 및 상표출원		암파쇄의 주요 원동력은 그 구성물질에 있음에도 불구하고 다분히 장치고 안적인 특허에 불과함.	암파쇄 주요소인 급팽창금속혼합물에대한 물질특허를 가지고 있음 플라즈마, 플라즈마셀, 플라즈마팩, 플라즈마캡슐, Plasma, Plasmacell, Plasmacapsule, Plasmacapsule에대한 상표.
제조공정		전해질 외주 생산 됨. 따라서 품질보증이 공인화 되어있지 않음.	완성품 개발이후 사업화 성공으로 자체 연구팀에 의하여 지속적으로 연구되고 있고, 품질시스템에 의한 자체 제품 생산으로 제품 품질력 보증.
장비무게 및 이동성		대형장비로 무게가 500kg 이상임 (차량이동)	장비설치 및 이동의 다양화 소형: 22kg(인력이동) 중형: 39kg(인력 및 장비이동) 대형: 67kg(장비이동)

나. 일반 미진동발파공법과의 비교

미진동파쇄기나 플라즈마를 사용하는 공법은 건교부 표준발파공법별 분류기준표¹⁸⁾ Table 5에 의하면 암파쇄굴착공법에 해당한다. 또한 대한화학발파공학회발표 "미진동 발파공법 적용사례에 관한 연구"에서 발파공법의 정의 및 적용방법에 의하면 저진동의 목적을 달성하는 각종 신기술의 범위(0.1cm/sec~0.2cm/sec 이내로 제어할 수 있는 공법)에 해당하므로 저진동 신기술 발파공법 혹은 미진동파쇄공법에 해당한다.¹⁹⁾ 미진동발파공법은 발파공내에 화약과 점화구를 결합하여 장약하고 전색한 다음 발파기로 점화구를 점화하여 화약을

기폭시킴으로서 암반을 절취하는 공법이며, 플라즈마공법은 발파공내에 전해질등을 장약하여 전기 에너지로 기폭하여 암반을 절취하는 공법이다. 이 두 공법을 비교설명하면 Table 4와 같다.

- 지전류나 누설전류가 흐르는 장소에서 일반 화약을 사용한 미진동발파공법은 사용에 제한을 받으나 C.S.Kim capsule을 사용하는 나노플라즈마공법은 높은 고전압(4,000V)의 전기에너지로 반응을 시키므로 사용장소에 제한을 받지 않는 공법이다.
- 화약을 사용한 미진동발파공법의 암반파쇄 메카니즘은 파쇄 대상암반에 충격파에 의해 균열을 발생시킨 후 다량의 가스방출로 균열을 성장 발달

시켜 암반을 파쇄하지만 본 공법은 capsule내 전해질의 반응에 의해 발생하는 초고온과 고압의 순간충격력으로 암반에 균열을 발생시켜 암반을 파쇄하는 공법이다.

c) 미진동 발파공법은 암반파쇄에 초기의 강한 충격력이 주(主)가 되며 2차적으로 발생하는 발파공내의 높은 가스압력의 지속시간이 길고 위력이 약하여 1차적으로 파쇄된 암석파편의 비산확률이 높은 반면에 나노프라즈마공법은 초고온에 의한 순간적인 열팽창압력으로 암반에 충격력을 가하여 파쇄한 후 즉시 감압·소진되어 진동·소음 및 비석공해가 거의없는 획기적인 공법이다.

d) C.S.KIM capsule을 이용한 나노프라즈마공법은 진동의 감쇄효과가 특히 큰 특성이 있으므로 보안물건에 더욱 근접하여 시공할 수 있으며, 보안물건으로부터 동일한 이격거리에서 회당 전해질량을 많이 사용할 수 있어서 현장안전성과 적용성은 물론 이고 매우 경제적인 공법이다.

e) C.S.KIM capsule은 물질이 매우 안정되어있어 취급, 운반이 편리하며 허가를 필요로하지 않지만, 일반 미진동발파공법은 폭약의 취급 및 운반에 해당하므로 각별한 안전조치가 요구된다.

f) 나노프라즈마공법은 진동, 소음 및 비산이 극히 적기 때문에 기존 구조물과 근접하여 폭약을 사용하지 못하는 굴착구간에 시공이 가능하며, 기계굴착공법에 비하여 대량 파쇄작업이 가능하다.

건교부 표준발파공법별 분류표에 의한 암파쇄굴착공법(TYPE I) 및 대한화학발파공학회 발표(2002.9) 발파공법의 적용방법, 각 공법별 특징 및 경제성 비교표에 의하면 공사현장에서 가장 많이 사용하고 있는 공법의 종류와 특징을 간단히 설명하면 Table 6과 같다.

Table 4. Nano plasma vs. blasting method

		나노프라즈마 공법	미진동 발파공법
사용량		500g	500g
점화방식		4,000V 전기에너지	점화구사용
소음	10m	70dB(A)	80dB(A)
진동	10m	0.1cm/s 이하	0.5cm/s 이상
진동주 주파수		100Hz 이상의 고주파	50Hz 이하의 저주파
가 스 량		5% 이하	80%이상
유해가스		없음(N2)	많음(SO2, CO, N2O, P2O3)
파암효과		진동이 작고 진동감쇠가 뛰어나 구조물에 보다 근접해서 안전한 시공가능	소음,진동,비산먼지등의 발파공해로 인해 민원발생 및 구조물피해 상대적으로 높음

Table 5. KDOCT blasting method table¹⁸⁾

구 분	특수발파		제한 발 파		무제한 발파	
	TYPE I 암파쇄굴착공법	TYPE II 정밀진동제어발파	TYPE III·IV 진동제어발파		TYPE V 일반발파	TYPE VI 대규모 발파
공법개요	특수화공품인 「미진동파쇄기」 「나노프라즈마」를 사용하는 공법으로 대형 브레이커에 의한 2차파쇄를 실시하는 공법	소량의 폭약으로 암반에 균열을 발생시킨 후, 대형 브레이커에 의한 2차 파쇄를 실시하는 공법	발파영향권 내에 보안물건이 존재하는 경우 “시험 발파” 결과에 의해 발파설계를 실시하여 규제 기준을 준수할 수 있는 공법		1공당 최대 장약 량이 발파 규제기준을 충족시킬 수 있을 만큼 보안물건과 이격된 영역에 대해 적용하는 공법	발파영향권 내에 보안물건이 전혀 존재하지 않는 산간 오지 등에서 발파효율만을 고려하는 공법
사용폭약 및 화공품	미진동파쇄기 「및 프라즈마」 등	에멀전 계열 폭약	에멀전 계열 폭약		에멀전 계열 폭약	주폭약 : 초유폭약 기폭약 : 에멀전
						
천공직경	φ 51mm 이내	φ 51mm 이내	φ 45~76mm	φ 76mm	φ 76mm 이상	
천공장비	 또는  ※ 공기압축기식 크로올러 드릴 또는 유압식 크로올러 드릴 선택 사용					
사용 비트						
◆발파패턴◆	암파쇄굴착공법	정밀진동제어발파	진동제어발파 소규모 중규모		일반발파	대규모 발파
천공깊이(m)	1.5	2.0	2.7	3.2	5.7	11.5
최소저항선(m)	0.7	0.8	1.0	1.4	1.7	2.2
천공간격(m)	0.7	0.8	1.20	1.6	1.9	2.5
파쇄 정도	균열만 발생 (보통암 이하)	파쇄 + 균열	파쇄 + 균열		파쇄 + 대괴	파쇄 + 대괴
계측관리	필수	필수	필수		선택	불필요
발파보호공	필수	필수	필수		불필요	불필요
2차 파쇄	대형브레이커 적용.	대형브레이커적용.	-		-	-

※ 천공깊이, 최소저항선, 천공간격 치수는 평균값이고 공사시행전에는 시험발파에 따른 현장별로 적용할 것.

Table 6. Comparison of TYPE I rock splitting methods

구분	분 류	미진동발파공법	미진동 파쇄공법	
			유압할암공법	나노플라즈마 공법
원 리		화약 및 폭약을 사용하는 유기화합물의 고열, 고압에 의한 가스압력으로 암반파쇄(가스발생량:80%<)	기계적 파쇄의 일종인 유압에 의한 급속 썩기팽창력	화학식 파쇄의 일종인 급팽창 급속혼합물에 의한 고열, 고압의 플라즈마 팽창력(가스발생량:<10%)
안전성		충격, 열, 마찰 민감	충격, 열, 마찰 안전	충격, 열, 마찰 안전
작 동		점화구 및 너관	유압력	전기스파크
시공방법		천공→장약→전색→발파	천공(φ100)→잭삽입→유압상승→파쇄→2차 파쇄	천공(φ51)→캡슐삽입→전색→파압
장 · 단 점	장 점	- 시공성, 경제성이 미흡함 (미진동파쇄기 장진후 급결체메지로 인해 30분내지 1시간후 발파, 가격 및 시공성미흡)	- 진동, 소음, 비산 없음	-제어발파대비: 물질자체의 우수한 취급안정성과 저진동, 저소음, 무비산의 환경친화성 매우우수 -유압할암공법 대비: 시공성, 경제성 우수
	단 점	-진동, 소음, 비산 발생 및 유해가스 발생 -폭약대비 낮음. 경제성 -물질 안전성 낮음	-시공성 낮음 -시공단가 높음	-발전기 또는 일반전기요구됨 -제어발파 대비 시공단가 높으나 미진동발파대비 총공사비는 낮음
환경영향	소 음	소음발생	무소음	저소음
	진 동	미진동	무진동	극미진동
	비 산	우려됨	없 음	거의 없음
경제성 (보통암) (설계가)		37,883원/㎡ (대한주택공사)	64,600원/㎡ (건적실무)	39,000원/㎡ (2004 건설적산)
특정	시공성	불 량	불 량	양 호
	1일 작업량	불 량	불 량	양 호
종합검토의 견		진동은 양호하나, 시공성 및 작업량이 제어발파에 비교시 낮다.	소음, 진동, 비산이 없으므로 안전성은 뛰어나나, 작업속도가 극히 늦고, 경제성이 매우 좋지 않음	소음, 진동, 비산이 극히 적고 취급시 안전성이 뛰어나며 제어발파대비 민원발생방지와 유압할암공법대비 시공성과 경제성이 뛰어나다.

3.2 바위파쇄 비교시험 결과

부산 ○○신축 공사장 시험시공

가. 실험개요 및 제원

위치: 부산광역시 중구 ○○신축공사 현장

공법: 유림 나노프라즈마 파암공법

일시: 2005년 7월 21일

Fig. 11과 같이 당 현장은 일축압축강도가 매우 높은 중경암이상의 안산암 지대로서 부산 지하철 1호선과 직선거리 15m(최근접지역기준)에 위치한 현장이다. 시험과암은 Class-600(Fig. 12참조)을 사용하여 천공패턴은 Fig. 13같이 천공을 하였다. 암 파쇄는 자유면으로부터 5공씩 총 3회에 걸쳐 파암을 실시하였다.

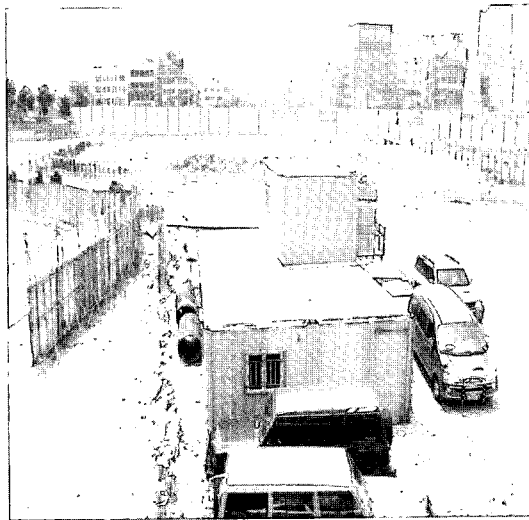


Fig. 11. Picture of the work site.

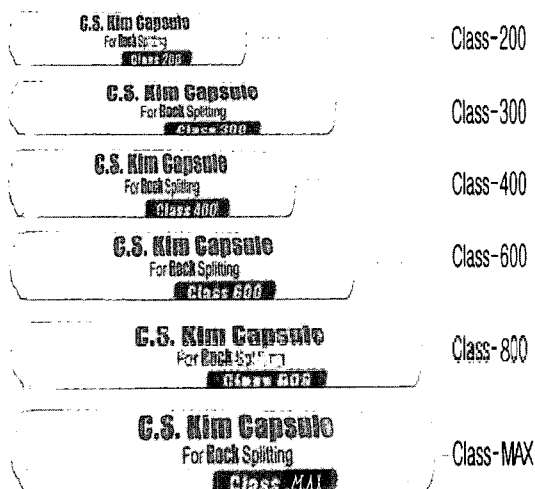


Fig. 12. C.S.KIM capsule series.

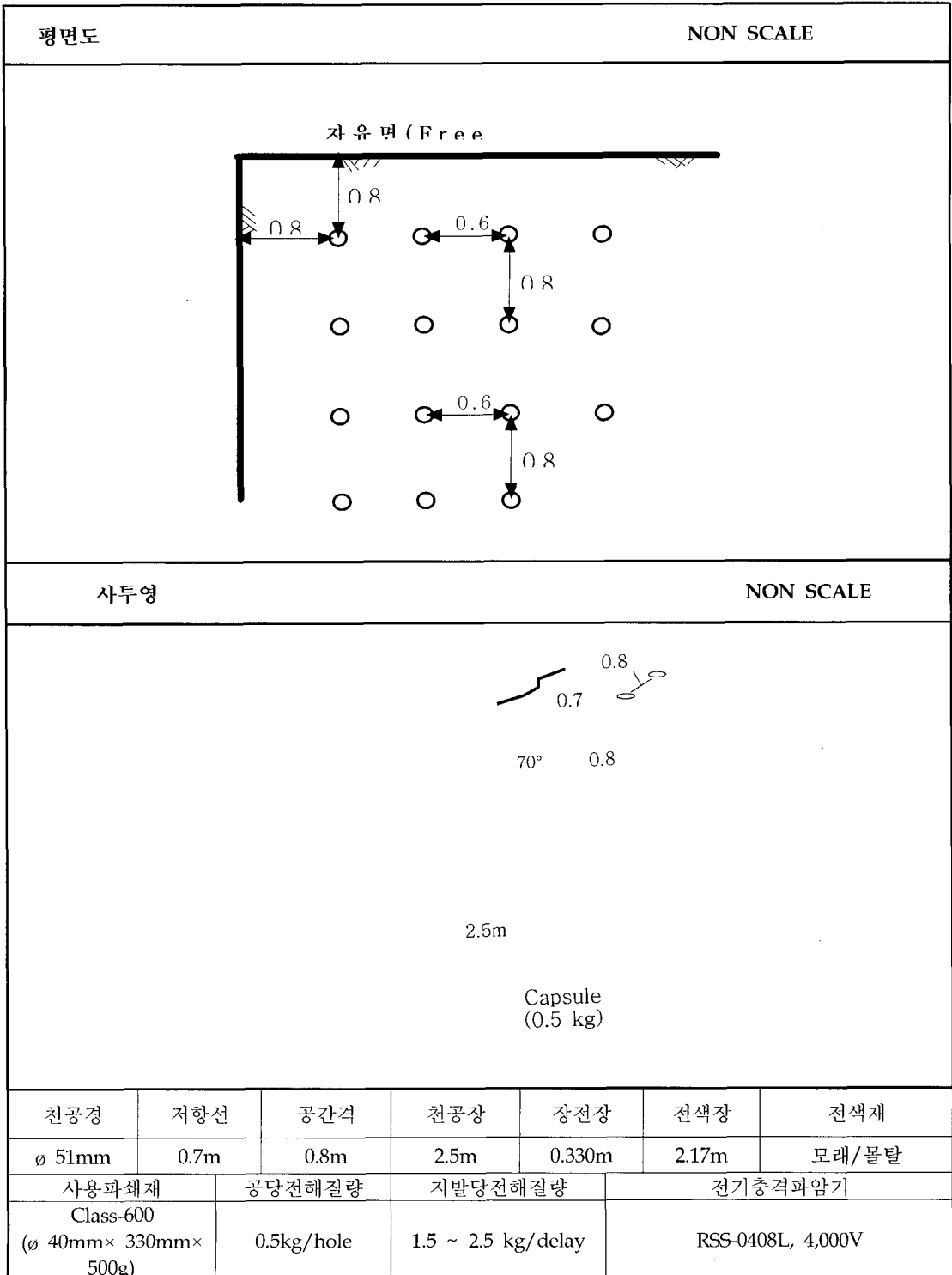


Fig. 13. Drilling pattern.

나. 실험결과 및 고찰

현장내에 파암 지점으로부터 직선거리 25m 지점에서 진동 및 소음을 계측 하였다. 이때 진동, 소음의 측정값은 Table 7 과 같다.

Table 7. Measured results

회 차	진동 (cm/sec)	소음 (dB(A))	비고
1	0.02	78.0	직선거리:25m 에서 측정
2	0.04	72.0	
3	0.1	69.0	

cm/sec(센터세크),dB(A)(데시벨에이)

측정된 진동 및 소음은 도심지 진동·소음안전 관리기준 [진동0.3cm/s, 소음80dB(A)]의 1/10내지 1/3이내로 측정 되었다. 이때 3회차 파암 에서는 앞열의 파쇄된 암반으로 인해서 반사(증폭) 작용에 의해서 진동이 다소 증가한 것으로 보인다. 따라서 자유면 확보와 동시에 정밀파암을 실시 한다면 향후 지하철과 15m인접한 최근접지점에서도 허용 진동기준치이내에서 시공성 및 안전성을 확보하면서 파암작업을 진행 할 수 있을 것으로 판단된다.

서울 ○○ 아파트 신축공사현장

가. 공사개요

공사명: ○○아파트 신축공사 현장
 발주처: (주) 효 명
 시공사: (주)대우자판 건설사업부 / 플라즈마 파암 시공 유림소재
 위 치: 서울특별시 ○○지구
 공 법: 유림 나노플라즈마 파암공법
 일 시: 2004년 4월 1일

나. 공사현황

○○ 신축공사현장은 지하 구조물 축조를 위한 터파기 현장으로서 굴착구간에 암반(강한 편마암)이 노출됨에 따라 공사기간, 공사비, 공사의 효율성 등을 고려하면 화약에 의한 발파작업이 요구되지만, Fig. 14와 15와 같이 주변에 근접되어 지하철6호선, 고가도로, 빌딩, 상가 등이 밀집되어 발파작업에 따른 공해(진동, 소음, 비산 등)의 영향으로 나노플라즈마 공법이 적용되었음.

다. 계측결과

현장 내 18m 지점에서 7회의 시험파쇄를 통하여 측정된 진동과 소음의 계측결과는 Table 8과 같다. 즉 도심지 진동안전기준치 0.3cm/sec 대비 20%정도에 해당하였다.

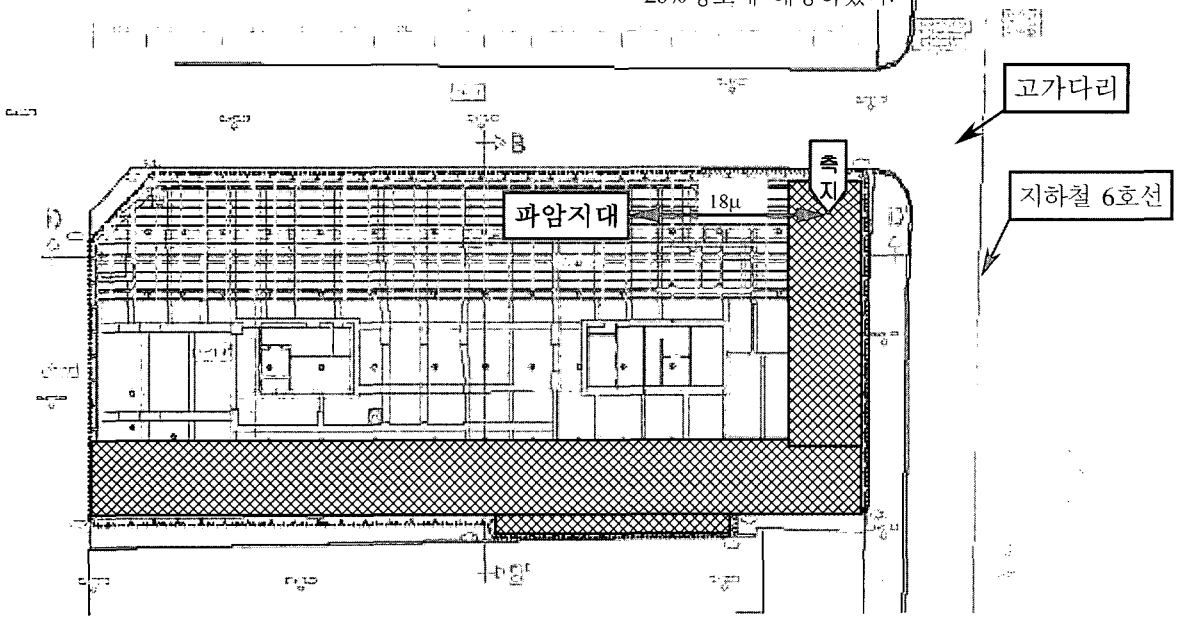


Fig. 14. Monitoring point [hatched area] : vibration sensitive area.

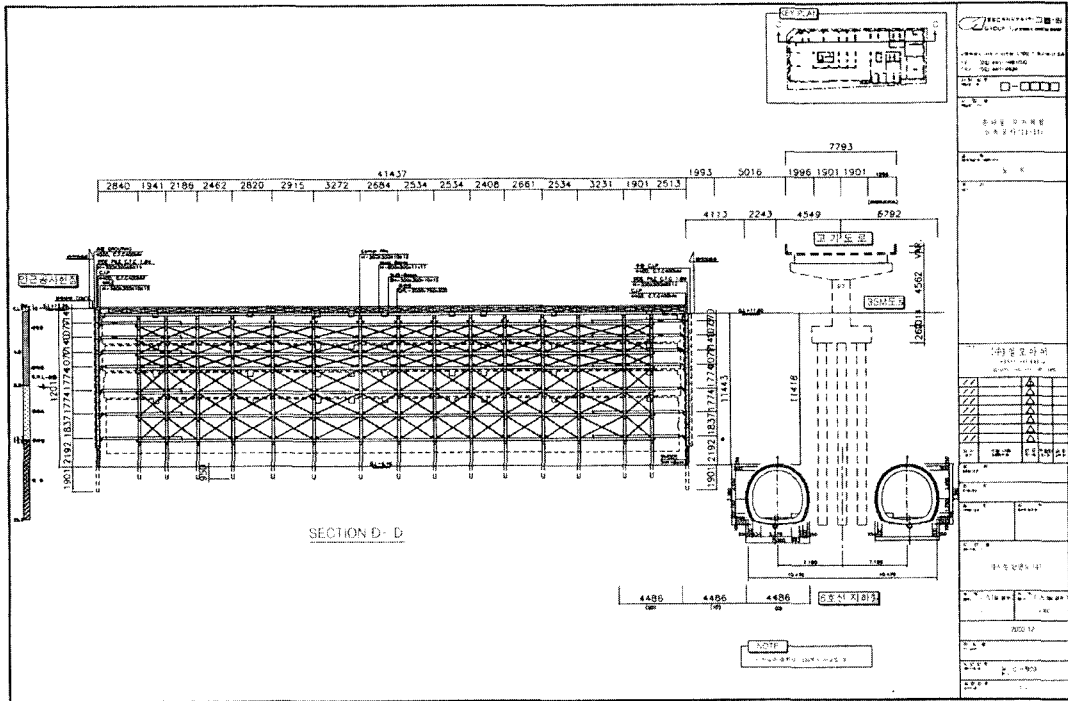


Fig.15. Excavation drawing.

Table 8. Measured data

횃 수	진동 [cm/sec]	소음 [dB(A)]	비고
1	N/T	65	직선거리 18m에서 측정
2	N/T	-	
3	0.0622	64	
4	0.0582	69	
5	0.0539	68	
6	N/T	-	
7	0.0539	70	

※N/T(NO Triggered): 미검측, cm/sec(센터세크), dB(A)(데시벨에이)

서울○○ 재개발 신축공사장 비교시험

가. 공사개요

공사명 : ○○ 재개발 현대 흙타운 신축공사
 발주자 : ○○ 재개발 조합
 위치 : 서울특별시 성북구 ○○지구
 공법 : 유립 나노-플라즈마 및 정밀진동제어발파,
 리퀴드 발파
 일시 : 2004년 10월 22일

나. 공사현황

본 공사구역은 작업장 동쪽으로 3m 도로와 도로건너 수녀원이 위치해 있으며, 서남쪽으로 교회, 남쪽으로는 집과 주택 가옥들이 있으며 북쪽으로는 음식점과 주택들이 인접해 있다. 따라서 암굴착 작업시 진동과 소음 등의 공해에 대한 각별한 주의가 필요한 현장이다.

다. 파암 패턴 및 계측결과

Table 9와 같다.

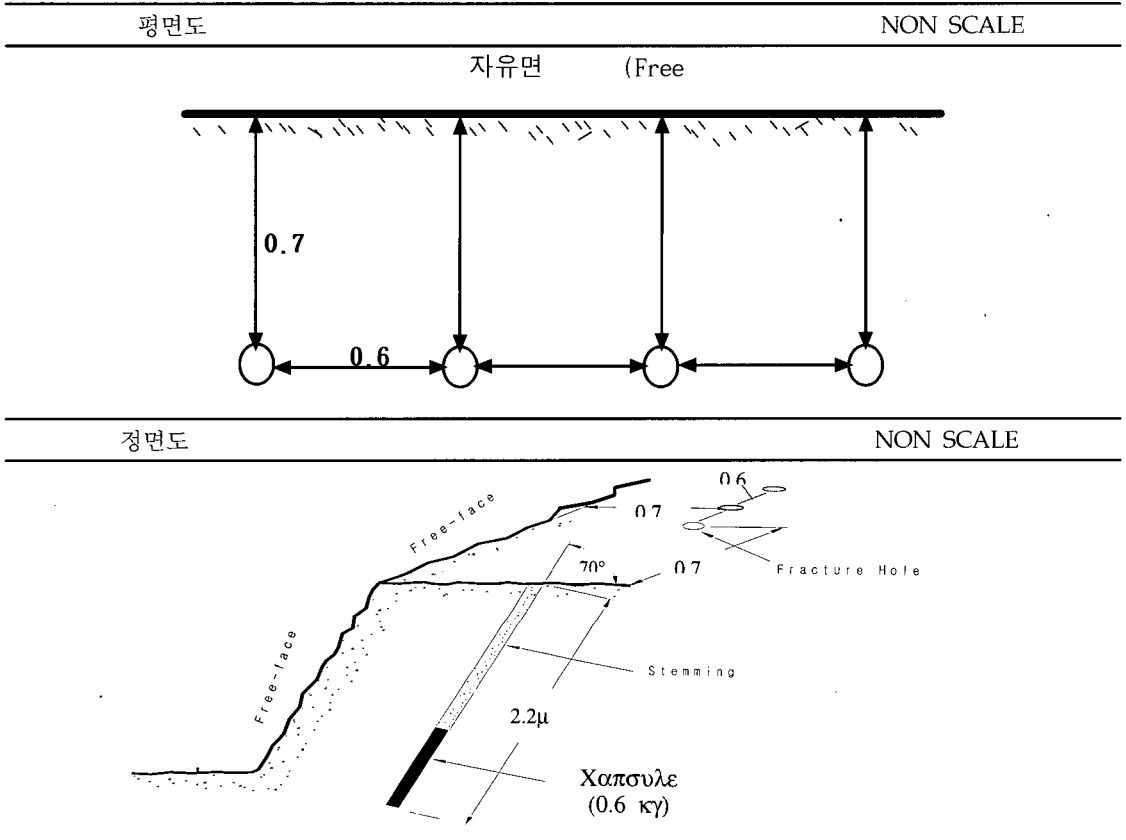
○○재개발 APT현장의 시험파암 결과를 요약하면

Table 9. Monitoring results

구분	사용제품	발파제원 (H*W*S)	지발당 장약량	진동·소음측정결과
Emulsion Explosive	NewMite $\phi 32$	2.0*0.7*0.8	0.5kg (거리 15m)	0.219~0.718cm/sec 66.4~76.2dB(A)
Nano Plasma	C.S Kim's capsule #600	2.0*0.7*0.8	1.0~1.5kg (거리 15m)	0.0635cm/sec이하 57.4dB(A)이하
Liquide Explosive	NewMite + Liquide	2.5*0.8*0.6	0.5kg (거리 15m)	0.618~0.881cm/sec 68.8~74.6dB(A)

* cm/sec(센터세크), dB(A)(데시벨에이)

라. 파암 패턴도



천공경	저항선	공간격	천공장	장전장	전색장	전색재
$\phi 51\text{mm}$	0.7m	0.6m	2.2m	0.345m	1.855m	흙 + 점토
사용파쇄재		공당전해질량	지발당전해질량	전기충격파암기		
Series-600 ($\phi 40\text{mm} \times 345\text{mm} \times 600\text{g}$)		0.6kg/hole	1.8kg/delay	RSS-9500L, 5,000V		

Fig. 16. Drilling pattern.

5. 결론

급팽창 금속혼합물을 이용한 나노플라즈마 바위 파쇄공법은 기체의 폭발 충격력이 아닌 금속분말의 급격한 팽창압으로 발생하는 고열의 플라즈마의 힘으로 암반을 파쇄한다. 따라서 경암 파쇄능력과 절리로 인한 안정성 효과²⁰⁾ 즉 감쇠효과가 우수하므로 주변구조물에 대한 니어미스 방지와²¹⁾ 충격진동이 적어 기존 폭약을 사용한 바위파쇄 공법보다 공사 현장에 적용하기에 더욱 알맞은 공법으로 사료된다. 연구 결과를 정리하면 다음과 같다.

1. 에멀전폭약, 나노플라즈마, 액체폭약에 대한 비교 시험발파 결과에서 에멀전 폭약은 0.5kg, 15m 거리에서 소음 66.4 ~ 76.2dB(A), 진동이 0.219 ~ 0.718 cm/sec였고, 나노플라즈마는 1.0~1.5kg, 15m거리에서 소음이 57.4dB(A)이하, 진동이 0.0635cm/sec이하였으며, 액체폭약은 0.5kg, 15m 거리에서 소음이 68.8 ~ 74.6dB(A), 진동이 0.618 ~ 0.881 cm/sec였다. 이 결과에서 나노플라즈마 공법의 진동·소음 결과값이 상대적으로 매우 낮게 측정되어 진동 및 소음 저감에서 탁월함을 알 수 있다.
2. 나노플라즈마와 미진동발파공법의 파압효과를 분석한 결과 나노플라즈마공법은 발생진동이 매우 작고 고주파수로 인한 진동감쇠가 뛰어나 15m 인접구조물에 0.1 cm/sec(센티세크)로 예측되므로 구조물에 보다 근접해서 안전한 시공을 가능하게 하는 획기적인 진동·소음 감소공법이다. 그러므로 건교부 암파쇄굴착공법(TYPE I) 적용 공사장에는 나노플라즈마공법 적용이 가장 합리적이라고 사료된다.
3. 또한 금속분말로 구성된 C.S Kim capsule은 소량의 에너지로는 발화하지 않는 위험물 제1, 2류의 혼합물이므로 기존의 폭약 발파공법에 비해 매우 안전한 물질로 구성되어 있어서 일반적인 마찰, 충격, 열에 전연 반응하지 않아 매우 안전하여 바위 파쇄의 목적 이외에 테러 등의 용도로 쓰여질 수 없으며, 제품 사용시 유해가스를 발생하지 않아 환경친화적인 선진 바위파쇄공법이다.

참고문헌

1. 김재극, 1988, 산업화약과 발파공학, 서울대학교 출판부, pp. 366.
2. 한국토지개발공사, 1993, 암발파설계 기법에 관한 연구, pp. 353.
3. 류창하, 1993, 발파영향평가 및 발파공법연구, 한국자원연구소, pp. 13-31.
4. 안명석, 류창하, 박종남, 2001, 건설현장에서 안전성향상을 위한 지반진동·소음·비산먼지 측정자료의 분석에 관한 연구, 화약·발파, Vol. 19, No. 3, pp. 97-98.
5. 이정훈, 안명석, 류창하, 2004, FTA기법을 이용한 발파사고 분석에 관한 연구, 화약·발파, Vol. 22, No. 1, pp. 49.
6. 윤성현, 안명석, 이광열, 2003, 화성암반에서 터널발파 진동측정치 분석에 관한 사례연구, 화약·발파, Vol. 21, No. 1, pp. 75.
7. Lee, H. H., 1990, Fundamentals of Microelectronics Processing, McGraw - Hill International Editions, pp. 35.
8. 안명석, 조명찬, 김종현, 2004, 에멀전화의 최적 조건과 예감제침가에 관한 연구, 화약·발파, Vol. 22, No. 1, pp. 1-2.
9. 이수경, 하동명, 1995, 화공안전공학, 동화기술, pp. 54.
10. 김성국, 2005, 나노플라즈마 상태를 이용한 미진동 암파쇄공법, (사)대한화약발파공학회 영남지회, 제8호, pp. 14-16.
11. 안명석, 김종대, 김남수, 2000, 대구지역 지층의 지질특성과 대표암반에 대한 발파 진동계수산출, 터널과 지하공간, Vol. 10, No. 2, pp. 216.
12. 김일중, 김영근, 2004, 급팽창 금속혼합물과 그 반응 촉발 장치를 이용한 파압 공법의 설계 및 시공 방법에 관한 연구, 발파기술 워크샵, pp. 129-149.
13. 안명석, 박종남, 2000, 대구규장암지역의 발파 진동 측정자료에 의한 K 및 n의 변화추이에 대한 고찰, 한국자원공학회지, Vol. 36, No. 4, pp. 13.
14. 기경철, 김일중, 1999, 발파공학, 기공사, pp. 248-249.
15. 윤지선, 김상훈, 플라즈마 공법에 의한 암석파

- 괴의 실험적 연구, 터널기술, Vol. 4, No. 1, pp. 33.
16. Konya, C. J. and E. J. Walter, 1990, Surface Blast Design, Practice-Hall, Inc., pp. 256.
 17. Persson, P-A, R. Holmberg and J. M. Lee, 1992, Rock Blasting and Explosives Engineering, CRC, pp. 345.
 18. 건설교통부, 2004, 암발파 시공 및 설계 요령, pp. 14.
 19. 박주연, 이천식, 윤성현, 안명석, 류창하, 2002, 미진동발파공법 적용사례에 관한 연구, 화약·발파, Vol. 20, No. 3, pp. 40-41, 47.
 20. Dick, R. A., L. R. Fletcher and D. V. D'Andrea, Explosives and Blasting Procedures, pp. 58.
 21. Nugroho, D. S., P. S. Wulandari and M. S. Ahn, 2004, Construction Cases and Development Courses of Blasting Demolition Method, 화약·발파, Vol. 22, No. 4, pp. 36.



조 명 찬

1987년 한양대학교 화학공학과 공학사

1993년 미국 아칸사스대학교 공학박사

E-mail : mccho@dongseo.ac.kr

현재 동서대학교 응용생명공학부 전임교수



안 명 석

1985년 서울산업대학교 환경공학과 공학사

2000년 동아대학교 지구환경공학부 공학박사

E-mail : amspeoff@chol.com

현재 동서대학교 응용생명/건설공학부 겸임교수



김 성 국

E-mail : yulim@cscapsule.com

현재 (주)유림소재 프라즈마사업부 부장
