

플라즈마 파암공법의 진동분석에 관한 기초적인 연구 A Fundamental Study about Vibration Analysis of Plasma Rock Fragmentation Method

윤지선¹⁾, Ji-Son Yoon, 김상훈²⁾, Sang-Hoon Kim

¹⁾인하대학교 지구환경공학부 교수, Professor, Division of Environmental Geosystem Engineering, Inha Univ.

²⁾인하대학교 대학원 지구환경공학부 석사과정, Graduate Student, Division of Environmental Geosystem Engineering, Inha Univ.

SYNOPSIS : Blasting method is used most engineering works for rock excavation. Blasting method is done much to upgrade of operation efficiency, contraction of construction period than other method. But blasting method happens damage by blasting vibration, noise and scattering. Therefore this study examined about effect, characteristic and application of Plasma method. To confirm effect measured vibration, noise and frequency, and analyzed data compare with general blasting.

Key words : Plasma, Blast, Vibration Analysis, Rock Fragmentation, FFT Analysis.

1 서 론

암반의 굴착기술은 지하공간 개발은 물론 광산, 토목, 건설 등 다방면에서 기본요소가 되고 있다. 현재 우리 나라의 각종 건설공사에 수반되는 굴착작업은 여러 가지 많은 기술들이 개발되고 있으나 아직까지는 화약류에 의한 발파작업이 주를 이루고 있다. 이는 화약류가 다른 작업에 비하여 경제성이나 작업 효율성 등에서 효과적이기 때문이다. 그러나 도심지에서 화약발파에 의한 굴착작업을 하는 경우 작업에 수반되는 환경 공해적 요소인 소음, 진동, 암석의 비산, 먼지 등은 끊임없는 민원발생의 원인이 되고 있다. 화약발파에 의한 굴착작업에서는 소음, 진동 및 분진의 발생을 피할 수 없어 대체방법으로 약액주입이나 유압식 할암기와 같은 미진동 및 무진동 굴착공법이 사용되고 있기는 하나 이들 방법은 작업공정의 성격상 생산성 및 효율성이 낮은 관계로 궁극적인 해결책은 되지 못하고 있다. 따라서 환경 공해적 요소를 최소화하면서도 시공성과 경제성을 함께 확보할 수 있는 파암공법이 요구되고 있는 실정이다. 현재 여러 가지 개발중인 공법 가운데 플라즈마 파암공법은 폭약을 사용하지 않고 전기적 방법으로 암을 파쇄하는 굴착방법으로 본 연구에서는 플라즈마 파암공법의 적용성에 대해 검토하고 일반발파에 비하여 발파공해에 얼마나 안정적인가를 연구해보고자 한다.

2 플라즈마 파암이론

2.1 플라즈마의 정의

모든 물질은 온도의 상승에 따라 상의 변화가 일어난다. 이 상의 변화 중에 기체상태에서 더 높은 온도를 가해주면 물질을 구성하고 있는 원자간의 결합이 끊어져 이온과 전자로 분리된다. 이 분리된 이온과 전자가 입자군을 이루는데 이 입자군이 전체적으로 중성인 하전 입자군을 형성한다. 이러한 하전 입자군을 플라즈마라 한다.

2.2 플라즈마의 파암원리 및 특성

2.2.1 파암원리

플라즈마 파암은 금속화합물이라는 전해질에 순간적으로 고전압(6000~8000V)을 가해주어 전해질을 플라즈마화 시켜 고온, 고압의 상태를 만들어 내는데 이 상태를 이용하여 암을 파쇄하는 원리이다.

2.2.2 특 성

플라즈마의 반응을 위해서는 고온(2,000℃)의 충격 열이 필요하고 반응을 촉발하는데는 고압의 전류 스파크를 이용한다. 이와 같이 전해질의 반응에는 높은 온도가 필요하므로 안정성이 높고(일반적으로 700℃ 이하에서는 반응하지 않음), 주재료가 금속의 팽창이므로 팽창력(20,000kg/cm² 이상)은 높으나 팽창한계가 작다. 또한 고주파를 형성시키므로 위험 및 폭발, 비산 등이 매우 적은 것이 특징이다. 그리고 플라즈마 발생재의 성분은 Al, Cu와 첨가제를 혼합하여 만든 분말 가루로서 화약과 달리 온도와 충격에 매우 안전하다.

2.2.3 일반기체 팽창반응(화약)과 고체팽창(플라즈마 발생재)의 변화특성 비교

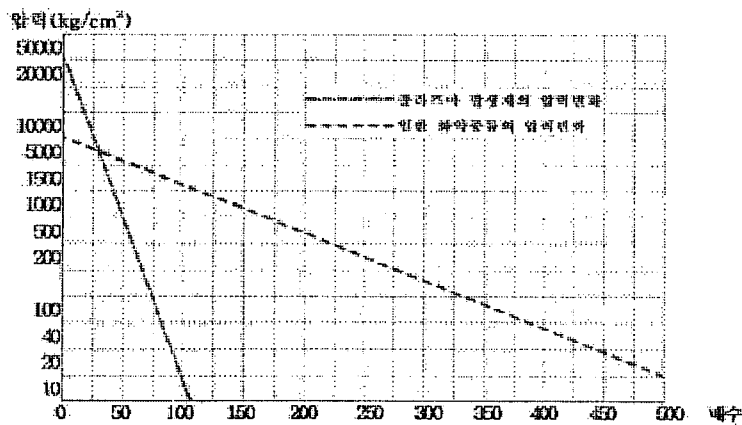


그림1 팽창재료 대 팽창반응 후 공간비

위 도표에서 일반 화약류의 초기 최대 한계압력은 $5,000\text{kg/cm}^2$ 이하로 재료체적의 500배 이상까지 10기압을 유지함으로써 목적물을 파쇄하고도 폭발 기체가 확산되어 비산, 폭발 발생소지가 높다. 그러나 플라즈마 발생재는 초기 최대압이 $20,000\text{kg/cm}^2$ 이상의 고압력을 발생하고는 목적물의 파쇄와 동시에 압력은 즉시 감소하는 현상을 나타냄으로써 비산, 폭발을 최소화한 것이다.

2.2.4 플라즈마 발생재의 안정도 시험

2.2.4.1 순폭시험

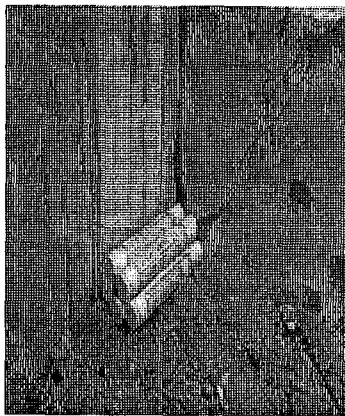


그림2 반응 전 전경

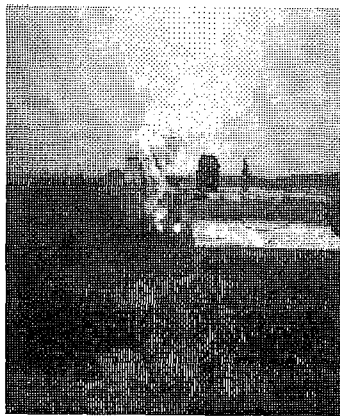


그림3 반응 전경



그림4 반응 후 전경

위의 그림에서와 같이 플라즈마 발생재 5개를 한 다발로 묶어 그 중 1개를 전기 충격에 의해 반응시킨 결과 4개의 플라즈마 발생재는 약간의 위치 이동만 있을 뿐 순폭이 되지 않았다. 즉 충격, 열, 마찰 등에 매우 강함을 보여주고 있으므로 운반 및 보관 시 매우 안전할 것으로 판단된다.

2.2.4.2 공간 및 수중 반응시험

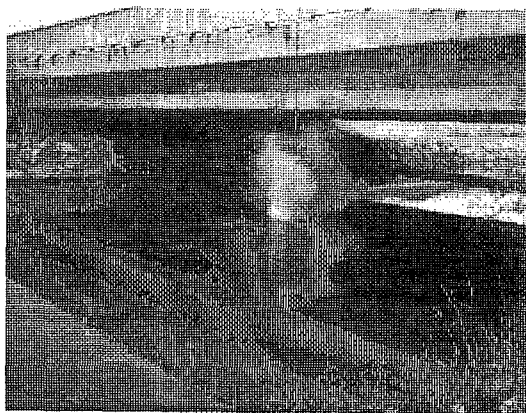


그림5 공간 반응 실험

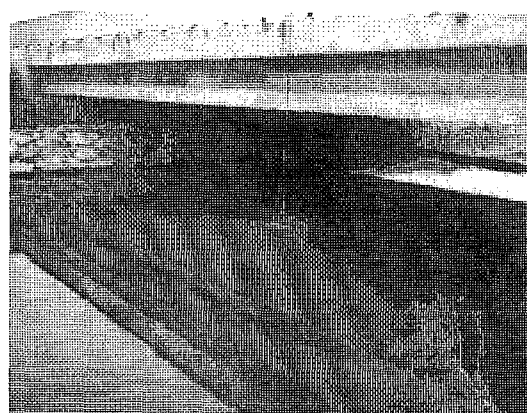


그림6 수중 반응 시험(수중 약 1m)

공간반응 시험결과 플라즈마 발생제가 반응 시 캡슐만 고열에 의해 분해되어 미립의 불꽃만 발생할 뿐 폭발은 전혀 없음을 보여준다. 수중반응실험 결과는 반응 시 물의 상승 및 물의 비산이 없고, 수면에 물방울만 약간 발생하는 것으로 보아 파쇄 메커니즘이 폭발이 아닌 팽창임을 나타내고 있다. 따라서 수중 파암이 가능함을 보여주고 있다.

3. 시험파암제원 및 계측결과

본 시험은 서울특별시 금천구 시흥 2동에 위치한 OO아파트 건설공사 현장을 대상으로 하였다. 본 지역은 전반적으로 선캠브리아기의 흑운모 호상 편마암 지대를 유라기의 대보 화강암이 관입하여 지표에 육기 상승한 지대로써 동고서저(東高西低)의 지형을 나타내고 있다.

표1 시험 지역의 암반분류

Parameter		Type-1	Type-2	Type-3
Uniaxial compressive strength(kgf/cm ²)	Value	261.0	387.7	820.1
	Rating	4	4	7
Drill core quality R.Q.D(%)	Value	55	60	66
	Rating	13	13	13
Spacing of discontinuities(m)	Value	0.06~0.2	0.3~0.6	0.3~0.6
	Rating	8	10	10
Condition of discontinuities(mm)	Value	1~5	1이하	1이하
	Rating	10	20	20
Groundwater	Value	None	None	None
	Rating	15	15	15
Rating		50	62	65
Description		Fair rock	Good rock	Good rock

3.1 파암지역 천공패턴 결정

표1의 내용을 근거로 암질에 따라 공간격의 차이를 두어 천공 Pattern을 설계한다. 천공 Pattern은 최소저항선, 공간격을 중심으로 한다. 파암패턴은 저계단식(Low bench) 발파패턴을 적용하였다. Low bench 범위는 계단높이 H에 대한 저항선 B의 비(H/B)가 4보다 작은 경우이다. 공간격(S)과 저항선(B) 및 계단높이의 관계는 다음과 같다.

$$S = (H + 7B) / 8 \quad (1)$$

공간격 S=1.25B이며 계산된 값에서 ±15%이내에서 조절할 수 있으나 저항선보다 적어서는 안된다.

표2 각 Type의 파암패턴

파암제원	계산값	각 Type 별 실제 적용값		
		Type-1	Type-2	Type-3
천공경(mm)	51	51	51	51
천공장(m)	2.00	2.00	2.00	2.00
최소저항선(m)	0.60	0.80	0.80	0.60
공간격(m)	0.80	0.80	0.80	0.80
천공각도	수직	수직	수직	수직
전해질량(g)	600	600	600	600
암질	-	Fair rock	Good rock	Good rock

3.2 계측결과

계측기는 Instantel사의 BlastMateIII, MiniMate Plus와 Thomas사의 VMS-200S를 사용하였다.

표3 Type-1의 계측결과

회차	진동 (mm/sec)	진동 (mm/sec)	진동 (mm/sec)	진동 (mm/sec)	진동 (mm/sec)	진동 (mm/sec)	진동 (mm/sec)	공수
	음압 (dB/L)	음압 (dB/L)	소음 (dB/A)	소음 (dB/A)	음압 (dB/L)	소음 (dB/A)	음압 (dB/L)	
1	5.2	2.3	1.71	1.20	N.T	N.T	N.T	2
	114.1	111.0	82.9	80.6	-	-	-	
2	2.8	1.1	1.17	0.84	N.T	N.T	N.T	3
	95.8	94.6	73.9	72.9	-	-	-	
3	6.7	1.9	1.86	0.92	0.95	N.T	N.T	2
	106.0	101.2	72.5	69.8	98.8	-	-	
4	1.2	0.7	N.T	N.T	N.T	N.T	N.T	3
	96.8	91.7	-	-	-	-	-	
5	2.2	0.9	N.T	N.T	N.T	N.T	N.T	3
	103.3	100.0	-	-	-	-	-	
6	5.0	2.4	1.88	0.95	N.T	N.T	N.T	2
	109.1	98.5	73.0	70.1	-	-	-	
7	2.6	0.8	N.T	N.T	N.T	N.T	N.T	3
	99.3	93.3	-	-	-	-	-	
거리	10	17	22	27	32	37	47	
계측기	V2-J27066	V2-J27067	BA5225	BE5273	BE5500	BE5501	BA5241	

*진동치가 trigger level인 0.07kine(cm/sec)로 전달되어 계측이 이루어지지 않음

표4 Type-2의 계측결과

회 차	진 동 (mm/sec)	진 동 (mm/sec)	진 동 (mm/sec)	진 동 (mm/sec)	진 동 (mm/sec)	공 수
	소 음 (dB/A)	소 음 (dB/A)	소 음 (dB/A)	소 음 (dB/A)	음 압 (dB/L)	
1	2.51	2.05	N.T	0.820	N.T	2
	78.3	75.6	-	70.8	-	
2	4.22	3.73	0.947	1.14	N.T	2
	81.8	77.9	68.9	74.2	-	
3	6.66	1.58	0.762	0.888	N.T	2
	82.5	77.3	67.9	74.0	-	
거리	9	14	16	19	24	
계측기	BA5225	BE5501	BA5225	BE5273	BE5500	

표5 Type-3의 계측결과

회 차	진 동 (mm/sec)	진 동 (mm/sec)	진 동 (mm/sec)	진 동 (mm/sec)	공 수
	소 음 (dB/A)	소 음 (dB/A)	음 압 (dB/L)	소 음 (dB/A)	
1	6.14	1.35	N.T	N.T	2
	98.4	97.6	-	-	
2	1.96	N.T	N.T	N.T	2
	95.5	-	-	-	
3	3.63	0.878	N.T	N.T	3
	101	106	-	-	
4	1.41	N.T	N.T	N.T	3
	106	-	-	-	
5	2.44	0.859	N.T	N.T	3
	91.4	89.3	-	-	
6	2.71	0.842	N.T	N.T	2
	93.1	92.9	-	-	
거리	5	10	15	20	
계측기	BA5225	BA5465	BE5500	BE5501	

4 고 찰

4.1 진동의 분석결과

충격진동 측정자료의 분석은 USBM 진동추정식을 사용하여 DS550(Canada InstanTEL 社) 프로그램을 이용하여 K와 n을 산출하였으며, 진동추정식은 다음과 같다.

$$V = K(SD)^{-n} \quad (2)$$

여기서, V : 입자속도(cm/sec, mm/sec)

K : 입지상수

SD : 환산거리 $D/W^{1/2}$, $D/W^{1/3}$, (m/kg^{1/2}, m/kg^{1/3})

D : 폭원과 수진점간의 거리(m)

W : 지발당 최대 장약량(kg)

n : 감쇠지수

자승근 환산거리는 장약이 긴 봉상으로 분포된 것에 기초한 것이고, 삼승근 환산거리는 장약이 구상으로 분포된 것에 기초한 것으로, 실제 자료처리에 있어서는 발파원의 특성에 관계없이 양자의 방법 모두를 이용하여 통계적으로 처리하여 더 높은 적합도를 보이는 환산 거리를 사용하였다.

표6 플라즈마와 일반발파 데이터의 회귀분석 결과

구 분		k (입지상수)	n (감쇠지수)	r ² (결정계수)	s (표준편차)	데이터 수	비고
Type-1	자승근	363	1.45	0.663	0.160	22	일반발파의 값은 당 현장에서 계측된 화약발파 자료에 의한 결과치이다.
	삼승근	320	1.45	0.663	0.160		
Type-2	자승근	2074	2.23	0.850	0.115	11	
	삼승근	1713	2.23	0.850	0.115		
Type-3	자승근	368	2.17	0.979	0.0383	10	
	삼승근	306	2.17	0.979	0.0383		
일반발파	자승근	748	1.39	0.602	0.0887	93	
	삼승근	914	1.40	0.608	0.0880		

4.2. 주파수 분석결과

진동 주파수는 1초 동안에 반복되는 진동의 수로 같은 지반진동 수준이라도 주파수에 따라 구조물에 미치는 영향의 정도가 달라지기 때문에 주파수 특성은 최근 중요하게 부각되고 있다. USBM이나 OSMRE에서도 낮은 주파수에 대해서는 진동규제치를 엄격히 제한하고 있다. 주파수 분석은 시간영역(time domain)에서의 진동파형을 주파수 영역으로 수학적으로 변환하는 푸리에 변환(FFT)을 Blastware 프로그램을 이용하여 플라즈마와 일반화약발파의 주파수를 분석하였다. 당 실험에서 계측된 각 Type 별 자료를 토대로 FFT을 실시한 결과 플라즈마 파암에 의한 탁월 주파수는 30~130Hz 사이에 분포하고 있다. 이에 반해 당 현장에서 계측한 일반화약발파의 탁월 주파수는 30~50Hz를 보이고 있다.

5. 결 론

1. 본 연구에서 나타난 플라즈마 파암의 감쇠지수 1.45~2.23으로 일반발파의 감쇠지수 1.39~1.40에 비해 크게 나타나고 있다. 화약발파공법에서 대부분의 민원이 근거리 보안물건에서 일어나기 때문에 플라즈마 공법의 큰 감쇠지수를 이용하면 근접한 보안물건의 파암작업도 가능할 것으로 판단된다.

2. 시험파암 결과 파암지점과 계측지점과의 거리가 약 15m 이상인 지점부터는 허용기준치인 0.5kine(cm/sec)을 초과하지 않고 있다. 15m 이상에서는 대부분의 진동치가 문화재나 컴퓨터 시설 등 민감한 보안물건에 대한 허용기준치인 0.2kine(cm/sec) 이내로 계측되었다.

이를 토대로 하여 현장에 알맞은 공법별 작업계획을 수립하여 일반 발파구간, 미진동 파암 구간, 무진동 파암구간을 설정하면 발파작업으로 인한 민원을 최소화하고 원활한 작업진행에 도움이 될 것으로 보인다. 소음 및 음압은 파암지점에서 20m를 경계로 하여 각각 약 80dB(A), 110dB(L) 전후로 계측되었다. 계측이 blast fence가 설치되지 않은 현장 내에서 실시되었기 때문에 펜스 설치 후 계측 시 더 많은 감쇠 효과를 나타낼 것으로 보인다.

3. 플라즈마 파암은 보안물건과 근거리에서 작업을 시행하는 미진동 공법이기 때문에 많은 약량을 요구하는 high bench에는 부적당하고 H/B<3 인 low bench에서 적용하는 것이 바람직하다. 그리하여 본 연구에서는 H는 2.0m로 하여 공간격, 최소저항선 및 암질의 변화에 중점을 두어 작업을 진행하였다. 연암(Type-1, RMR rating:50)에서는 계산식에 의한 제원보다 $\pm 15\%$ 의 오차를 두고 적용하여도 양호한 파쇄결과를 얻을 수 있었으나 보통암(Type-2, Type-3)에서는 계산식에 의한 제원을 적용해야 좋은 결과를 얻을 수 있었다. 즉 RMR값이 증가할수록 공간격 및 최소저항선을 감소시켜야 양호한 파암결과를 얻을 수 있다.

4. FFT분석 결과 플라즈마 공법의 주파수는 30~130Hz 사이에 분포하고 있다. 당 현장에서 계측한 일반 발파공법의 주파수는 30~50Hz를 보이고 있다. 주파수 특성은 발파원의 특성과 함께 전파매질인 암반 또는 지반의 특성에 따라 좌우된다. 일반적인 주파수 대역을 살펴보면 플라즈마의 주파수가 일반발파보다 높게 분포하고 있다. 구조물의 고유진동수 대역이 저주파임을 감안할 때 일반발파보다 플라즈마 파암이 더 효과적임을 알 수 있다.

6. 참고문헌

1. 기경철, 김일중 저, (1999), "발파공학", 기공사, pp.111~112
2. 한국자원연구소, (1996), "Plasma Blasting에 의한 암석파괴특성 연구(II)", pp.138~139
3. 천병식, 오민열 저, (1995), "바닥발파에서 암질지수(RQD)와 발파진동상수 K, n의 관계", 한국지반공학회지, 제11권 제3호, pp60~62
4. 이산산업(주), (1999), "NEW PLASMA 파암 특별시방서", pp.4~5
5. 특허출원(특1997-023888), 유림전자, (199), "급팽창 급속 혼합물"
6. 김재극 저, (1994), "산업화약과 발파공학", 서울대학교 출판부, pp.123~128
7. Michael F. Rosenthal and Gregory L. Morlock, (1987), "Blasting Guidance Manual. Office of Mining Reclamation and Enforcement(OSMRE)"
8. Chales H. Dowding, (1985), "Blasting Vibration Monitoring and Control", Prentice-Hall Inc.