

## 플라즈마 지발 전력충격파암기의 적정 지발시차 및 진동과 소음크기 고찰

원연호<sup>1)</sup>, 강추원<sup>2)</sup>, 김일중<sup>3)</sup>

### A Survey on the Magnitude of the Sound, Ground Vibration and Properly Delayed Interval of a Plasma Rock-Splitting Machine driven by Electric Shocks

Yeon-Ho Won, Choo-Won Kang and Il-Jung Kim

**Abstract** In this study, 5 steps of different delay intervals are applied to a plasma rock-breaking machine that is driven by electric shocks in order to improve the workability of the traditional single-shot type plasma rock-breaking operation. The sequential steps use the electrolyte volume per delay of 1, 2, 3, 4, 5 kg and it has been analyzed to measure the delay time and level of the ground vibration and noise according to exploding. The delay time of the rock-breaking machine by an electric shock of 5 steps has used about 40~50ms at the electrolyte connected from 1 to 3 holes, about 70~80ms at the electrolyte connected from 4 to 5 holes. It is identified that the extents of the ground vibration is low to 1 over 3~6 compared with that of the emulsion explosives

**Key words** Plasma, Delay time, Rock-breaking machine by an electric shock, Emulsion explosive

**초 록** 본 연구는 플라즈마 암 파쇄공법의 단발형태에 따른 시공성 향상을 위해 플라즈마 전력충격기에 5단계의 지발시차를 적용하여, 1단계부터 5단계까지 단계별로 지발당전해질량을 1kg, 2kg, 3kg, 4kg, 5kg으로 변화시키고, 기폭에 따른 지발시차와 진동및 소음의 크기를 측정 분석하였다. 분석결과, 5단계의 전력충격파암기의 지발시차는 전해질 연결개수 1-3공은 약 40~50ms, 4-5공은 약 70~80ms, 진동의 크기는 에멀전 폭약에 비해 약 3~6배 정도 낮은 것으로 확인되었다.

**핵심어** 플라즈마, 지발시차, 전력충격파암기, 에멀전폭약

## 1. 서 론

플라즈마 암 파쇄공법은 국토해양부 암 발파설계지침의 미진동굴착공법으로 분류되며 이들 공법은 대상보안물건의 허용진동규제기준과 이격거리에 의해 발파공법의 적용이 어려운 구간에 적용된다(건설교통부,

2006). 그러나 플라즈마 암 파쇄공법은 급팽창 금속 혼합물의 화학적 변화에 의한 연소형태로서 폭약을 이용한 발파공법에 비해 진동은 상대적으로 적게 발생되나 암반을 파쇄하는 전해질의 기폭은 뇌관과는 달리 시차를 부여하지 못하는 단발형태의 기폭으로 시공적인 측면에서는 암 파쇄 물량의 한계성을 가지고 있다(정일록, 1999). 본 연구에서는 플라즈마 암 파쇄공법의 단발형태 기폭에 따른 시공성 향상을 위해 플라즈마 전력충격파암기에 5단계로 지발시차를 부여할 수 있도록 하여 1단계부터 5단계까지 단계별로 지발당전해질량을 1kg, 2kg, 3kg, 4kg, 5kg으로 변화시

<sup>1)</sup> 원연비 기술사사무소 대표

<sup>2)</sup> 조선대학교 공과대학 에너지 자원공학과 교수

<sup>3)</sup> 엔-토비 기술사사무소 대표

\* 교신저자 : yhwon@paran.com

접수일 : 2009년 5월 20일

심사 완료일 : 2009년 6월 2일

게재 승인일 : 2009년 6월 16일

키어 기폭에 따른 지발시차와 진동 및 소음의 크기를 측정·분석하였다. 그 결과 5단계로 적용된 전력충격파암기의 지발시차는 전해질 연결개수 1~3공은 약 40~50ms, 4~5공은 약 70~80ms, 진동의 크기는 에멀전 폭약에 비해 약 3~6배 정도 낮은 것으로 확인되었다(록스코리아, 2008). 따라서 이러한 결과는 플라즈마 암 파쇄공법의 시공성 향상에 기여할 것으로 사료된다.

## 2. 실험

본 실험은 ○○지역 석산현장에서 수행하였으며, 지발시차 5단의 전력충격파암기를 이용하여 단계별로 지발당 최대 전해질량(1kg, 2kg, 3kg, 4kg, 5kg)을 변화시켜 기폭에 따른 진동과 소음의 크기, 그리고 지발시차의 정확성 및 적정 지발시차, 암석의 파쇄상태 등을 살펴보았다.

### 2.1 실험조건

#### 암반상태

실험지역의 현장 암반강도 실험(Rock test hammer)으로부터 추정된 압축강도는 106~123Mpa 정도이며, 보통암질로서 불연속면이 없는 비교적 신선한 상태이다.

#### 플라즈마 전해질 제원

본 실험에 사용된 플라즈마 전해질은 록스코리아 갈막 제품으로 제원은 중량 1000g/개, 외경 55mm, 길이 400mm이다.

#### 전력충격파암기의 제원

전력충격파암기는 순간적으로 매우 높은 전압으로 플라즈마 전해질을 기폭시키는 장치이다. 플라즈마

전해질은 급팽창 금속혼합물로서 상대적으로 에멀전 계열의 폭약에 비해 분해속도가 느리다. 이에 전력충격기의 지발시차는 진동증감, 발파효과, 비산에 대한 안전성 및 높은 폭음의 발생 원인이 되므로 적절한 지발시차를 결정하는 것은 매우 중요하다.

갈막 플라즈마 전력충격파암기는 Table 1과 같이 2종류가 있으나 본 실험에서는 지발시차 5단의 전력충격파암기(KAPAC-II)를 사용하였다.

### 2.2 시험 파암제원

플라즈마 시험파암에 따른 천공제원은 Fig. 1과 같이 천공장 2.2m, 공간격 1.2m, 최소저항선 1.0m로 설치하였으며, 기폭은 Fig. 2 및 Table 2와 같이 공(지발)당 전해질량을 1.0~5.0kg까지 달리하여 각각 2~3회씩 총 19회에 걸쳐 점화하였다.

### 2.3 계측 및 결과

#### 사용계측기 및 계측방법


파암작업에 따른 진동 및 소음측정 사용 계측기기는 파암으로 인하여 발생되는 3개 방향(수직, 접선, 진행)의 최대입자속도(PPV:Peak particle velocity) 및 실벡터합(PVS:Peak vector sum) 그리고 폭풍압을 동시에 측정하기 위해 Canada InstanTel 회사의 Blastmate II, DS-077, 477 등의 기종을 사용하였다.

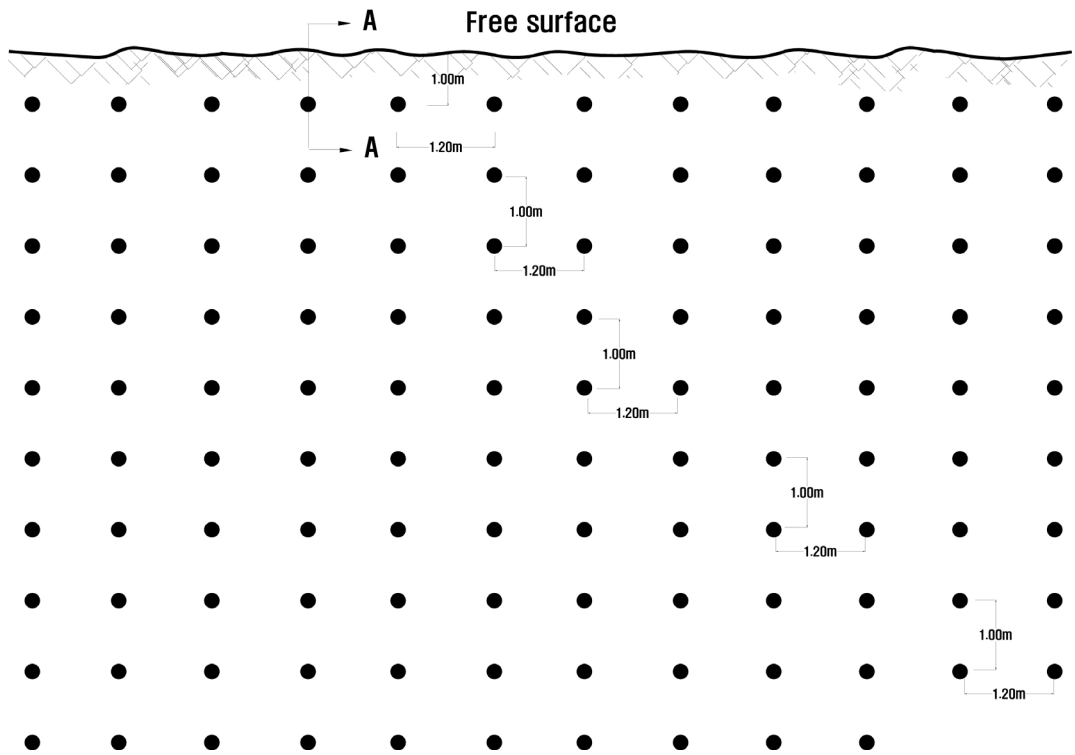
파암작업에 따른 계측은 지발당 최대전해질량을 5단계(1kg, 2kg, 3kg, 4kg, 5kg)로 적용하고 이에 따른 파암진동의 파형 분석 및 파암진동추정식 도출을 위한 회귀분석을 위해 현장 내 자유장 5m 간격으로 계측(5개소)을 수행하였다.

#### 계측결과

19회까지의 각 계측위치별, 파암작업에 따른 이격

Table 1. Specification of the rock-breaking machine by an electric shock

모 델 명	CAPAC-II	KAPAC-II	
입력전원	110V/DC12, 24V	220V/DC12, 24V	
크 기	35cm×23cm×41cm	35cm×23cm×41cm	
무 게	18kg	18kg	
동시 최대기폭 capsule수	50공	30공	



**A-A  
Cross-sectional view**

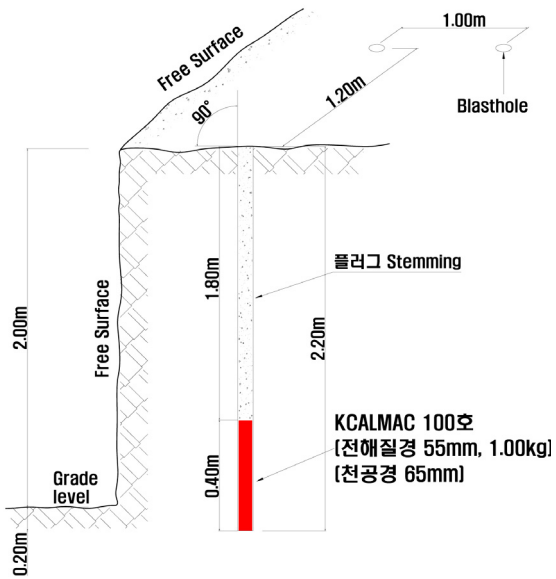


Fig. 1. View of the blast holes' arrangement.

### Firing Connection View

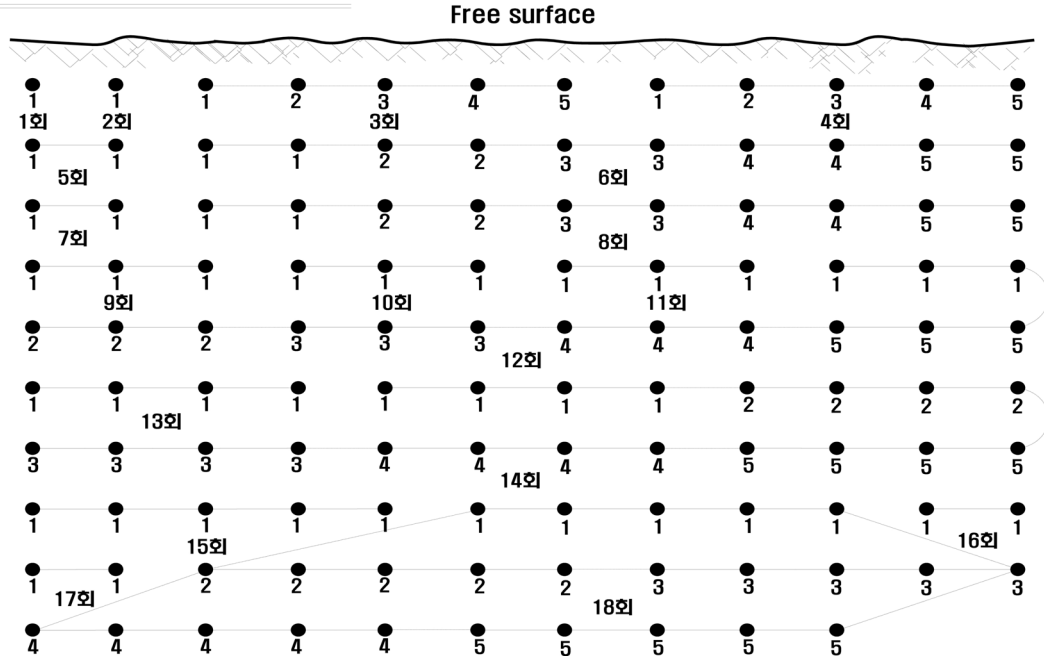


Fig 2. Firing connection view.

Table 2. Specification, number of rock breaking by plasma

파암 순서	공수/회 (공)	지발당공수 (공)	파암당 전해질량 (kg)	지발당최대전해질량 (kg)	비고
1	1	1	1.0	1.0	
2	1	1	1.0	1.0	
3	3	1	3.0	1.0	
4	2	1	2.0	1.0	
5	5	1	5.0	1.0	
6	2	2	2.0	2.0	
7	10	2	10.0	2.0	
8	2	2	2.0	2.0	
9	10	2	10.0	2.0	
10	3	3	3.0	3.0	
11	3	3	3.0	3.0	
12	3	3	15.0	3.0	
13	15	3	4.0	3.0	
14	4	4	4.0	4.0	
15	20	4	20.0	4.0	
16	5	5	5.0	5.0	
17	2	2	2.0	2.0	
18	2	2	2.0	2.0	
19	25	5	25.0	5.0	
계	118				

거리와 전해질량에 따른 각 방향의 진동치와 벡터 합 그리고 폭풍압의 예측결과는 Table 3과 같다.

**2.4 결과의 분석**

**플라즈마 암파쇄에 의한 파암진동 전파추정식 도출**

시험파암을 통해 총 95회의 자료로부터 회귀분석을 통하여 발파진동의 크기를 예측할 수 있는 자승근 환산식 식 (1)과 일반식 식 (2)에 의해 Table 4와 칼막플라즈마 파암진동 전파추정식을 도출하였으며 Fig. 3 및 Fig. 4와 같이 지반진동속도(각 방향성분 중 최대치, 최대 실벡터합)와 자승근 환산거리와의 관계를 나타내었다(기경철과 김일중, 2002).

$$V_1 = K_1 \cdot \left( \frac{D}{\sqrt{W}} \right)^{n_1} \tag{1}$$

$$V_2 = K_2 \cdot W^a \cdot D^b \tag{2}$$

여기서,  $V_1, V_2$ 는 지반진동속도( $cm/s$ ),  $n_1$ 은 감쇄지수,  $K_1, K_2$ 는 파암진동 입지상수,  $W$ 는 지발당 전해질량( $kg$ ),  $D$ 는 폭원과 측점간의 거리( $m$ ),  $a$ 는 장약지수,  $b$ 는 거리지수이다.

**플라즈마 암파쇄에 의한 폭음 전파 추정식**

칼막 플라즈마 전해질을 사용한 시험파암 결과(결정계수가 0.7에 미치지 못했지만) 암파쇄시 발생되어 전파되는 소음과 폭풍압의 전파 추정식은 식 (3) 및 식 (4)와 같다.

- 파암소음 전파 추정식 :

$$dB(A) = 85.6 - 13 \cdot \log\left(\frac{D}{\sqrt{W}}\right) \tag{3}$$

- 파암폭풍압 전파 추정식 :

$$dB(L) = 151.3 - 31 \cdot \log\left(\frac{D}{\sqrt{W}}\right) \tag{4}$$

**Table 3.** Results of ground vibration and air pressure on blasting

번호	파암원과의 거리 D(m)	지 발 당 전해질량 W(kg)	각방향의 진동치( $cm/s$ )			벡 터 합 ( $cm/s$ )	폭풍압 [ $dB(L)$ ]	비 고
			T	V	L			
1	15.53	1.00	0.267	0.222	0.235	0.356	109.5	M 1
2	15.06	1.00	0.298	0.229	0.305	0.373	106.0	M 1
3	14.05	1.00	0.146	0.210	0.133	0.219	109.5	M 1
4	14.16	1.00	0.215	0.140	0.152	0.220	100.0	M 1
5	14.15	1.00	0.0953	0.0762	0.318	0.322	109.5	M 1
6	14.38	2.00	0.578	0.686	0.635	0.989	115.6	M 1
7	13.09	2.00	1.070	0.864	1.140	1.280	119.1	M 1
8	13.48	2.00	0.425	0.521	0.591	0.779	114.0	M 1
9	12.09	2.00	0.965	0.889	0.914	1.220	120.8	M 1
10	12.30	3.00	0.914	1.020	1.470	1.710	122.3	M 1
11	11.19	3.00	0.917	1.120	1.300	1.690	122.9	M 1
12	11.19	3.00	0.584	0.330	1.350	1.470	122.3	M 1
13	10.20	3.00	1.170	1.450	1.630	1.870	125.1	M 1
14	10.23	4.00	1.420	1.600	1.070	2.060	119.1	M 1
15	8.00	4.00	2.340	1.930	4.170	4.800	126.8	M 1
16	8.21	5.00	1.270	2.130	1.120	2.310	124.6	M 1
17	9.21	2.00	0.991	1.240	2.080	2.460	124.1	M 1
18	8.52	2.00	0.829	0.457	0.368	0.854	114.0	M 1
19	5.34	5.00	10.100	11.800	10.200	15.200	125.6	M 1

Table 3. Continued(1)

번호	파암원과의 거리 D(m)	지 발 당 전해질량 W(kg)	각방향의 진동치(cm/s)			벡 터 합 (cm/s)	소 음 [dB(A)]	비 고
			T	V	L			
1	20.17	1.00	0.0826	0.208	0.227	0.241	59.6	M 2
2	19.80	1.00	0.254	0.186	0.314	0.411	59.6	M 2
3	19.05	1.00	0.0905	0.248	0.135	0.281	57.6	M 2
4	19.13	1.00	0.0794	0.148	0.116	0.194	53.0	M 2
5	19.12	1.00	0.143	0.119	0.238	0.284	56.4	M 2
6	19.03	2.00	0.213	0.483	0.548	0.662	66.8	M 2
7	18.07	2.00	0.762	0.591	0.560	0.770	71.4	M 2
8	18.09	2.00	0.306	0.473	0.545	0.716	64.6	M 2
9	17.07	2.00	0.597	0.589	0.630	0.760	74.8	M 2
10	16.93	3.00	0.557	1.020	1.090	1.410	70.8	M 2
11	16.14	3.00	0.749	0.838	1.090	1.410	81.6	M 2
12	16.14	3.00	0.533	0.483	1.400	1.570	64.8	M 2
13	15.15	3.00	0.737	0.876	1.670	1.820	79.8	M 2
14	14.83	4.00	0.559	1.190	1.180	1.310	68.4	M 2
15	13.00	4.00	1.320	1.410	2.440	3.020	79.6	M 2
16	12.76	5.00	0.851	1.550	1.240	1.640	70.8	M 2
17	13.42	2.00	0.648	0.876	1.600	1.750	65.2	M 2
18	12.56	2.00	0.273	0.325	0.518	0.549	79.4	M 2
19	10.19	5.00	3.100	2.930	4.130	5.150	79.4	M 2

Table 3. Continued(2)

번호	파암원과의 거리 D(m)	지 발 당 전해질량 W(kg)	각방향의 진동치(cm/s)			벡 터 합 (cm/s)	폭풍압 [dB(L)]	비 고
			T	V	L			
1	24.94	1.00	0.184	0.260	0.222	0.338	106.0	M 3
2	24.65	1.00	0.337	0.184	0.324	0.421	106.0	M 3
3	24.04	1.00	0.165	0.203	0.152	0.219	106.0	M 3
4	24.11	1.00	0.159	0.171	0.159	0.257	100.0	M 3
5	24.10	1.00	0.133	0.235	0.279	0.286	100.0	M 3
6	23.82	2.00	0.267	0.565	0.559	0.651	109.5	M 3
7	23.06	2.00	0.762	0.648	0.570	0.730	114.0	M 3
8	22.86	2.00	0.451	0.533	0.597	0.783	106.0	M 3
9	22.06	2.00	0.737	0.483	0.540	0.800	114.0	M 3
10	21.73	3.00	0.787	1.020	1.090	1.270	115.6	M 3
11	21.12	3.00	0.889	0.635	1.090	1.310	118.1	M 3
12	21.12	3.00	0.229	0.381	1.090	1.190	114.0	M 3
13	20.12	3.00	0.914	0.711	1.200	1.250	119.1	M 3
14	19.23	4.00	0.889	1.070	1.190	1.530	115.6	M 3
15	18.00	4.00	0.762	0.940	1.130	1.240	120.8	M 3
16	17.55	5.00	1.190	0.914	1.780	2.150	120.0	M 3
17	18.04	2.00	0.305	0.521	0.919	1.020	114.0	M 3
18	17.12	2.00	0.565	0.356	0.559	0.773	109.5	M 3
19	15.14	5.00	1.730	1.170	2.660	2.890	120.0	M 3

Table 3. Continued(3)

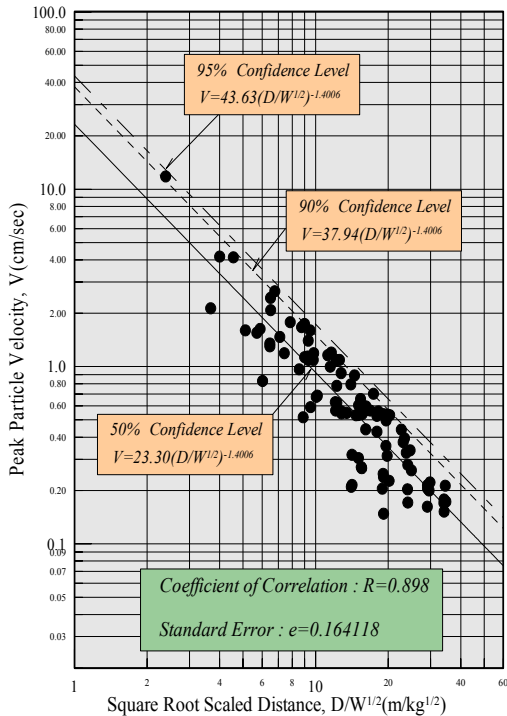
번호	파암원과의 거리 D(m)	지 발 당 전해질량 W(kg)	각방향의 진동치(cm/s)			벡 터 합 (cm/s)	폭풍압 [dB(L)]	비 고
			T	V	L			
1	29.79	1.00	0.121	0.217	0.222	0.239	57.8	M 4
2	29.55	1.00	0.0937	0.141	0.200	0.219	59.2	M 4
3	29.04	1.00	0.0952	0.162	0.146	0.177	59.2	M 4
4	29.10	1.00	0.0857	0.205	0.0841	0.206	55.3	M 4
5	29.09	1.00	0.116	0.214	0.200	0.254	54.7	M 4
6	28.69	2.00	0.287	0.389	0.532	0.566	65.4	M 4
7	28.06	2.00	0.449	0.536	0.592	0.560	69.6	M 4
8	27.71	2.00	0.313	0.425	0.497	0.538	73.3	M 4
9	27.05	2.00	0.513	0.406	0.539	0.580	66.7	M 4
10	26.60	3.00	0.441	0.460	0.656	0.679	65.3	M 4
11	26.10	3.00	0.478	0.454	0.605	0.640	72.5	M 4
12	26.10	3.00	0.294	0.533	0.518	0.561	61.8	M 4
13	25.10	3.00	0.554	0.891	0.697	0.908	70.3	M 4
14	24.51	4.00	0.538	0.537	0.625	0.665	65.2	M 4
15	23.00	4.00	0.581	0.965	0.999	1.260	72.7	M 4
16	22.49	5.00	0.675	0.427	0.659	0.713	63.9	M 4
17	22.82	2.00	0.275	0.427	0.443	0.470	60.8	M 4
18	21.87	2.00	0.271	0.170	0.202	0.283	59.2	M 4
19	20.11	5.00	0.967	0.973	1.470	1.770	72.3	M 4

Table 3. Continued(4)

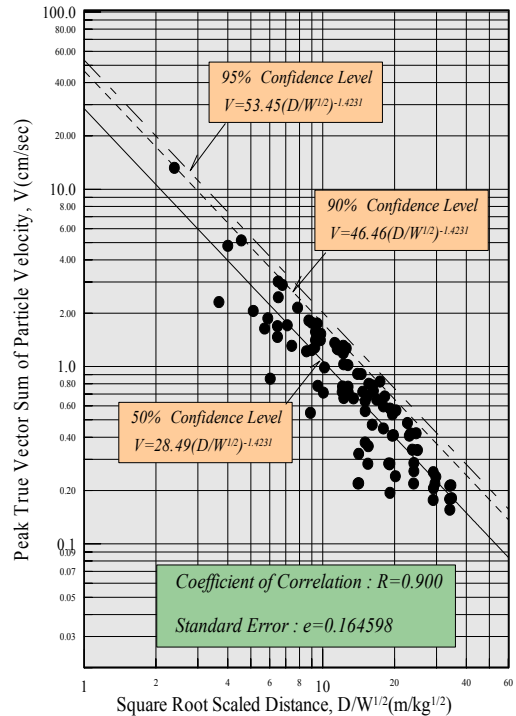
번호	파암원과의 거리 D(m)	지 발 당 전해질량 W(kg)	각방향의 진동치(cm/s)			벡 터 합 (cm/s)	폭풍압 [dB(L)]	비 고
			T	V	L			
1	34.69	1.00	0.0619	0.173	0.0968	0.181	55.2	M 5
2	34.47	1.00	0.100	0.0889	0.213	0.214	58.0	M 5
3	34.04	1.00	0.0889	0.170	0.106	0.179	57.4	M 5
4	34.09	1.00	0.0667	0.152	0.0714	0.156	51.0	M 5
5	34.08	1.00	0.0667	0.178	0.159	0.213	54.2	M 5
6	33.59	2.00	0.192	0.327	0.273	0.340	62.2	M 5
7	33.05	2.00	0.349	0.379	0.394	0.420	66.6	M 5
8	32.61	2.00	0.224	0.294	0.375	0.408	64.0	M 5
9	32.05	2.00	0.340	0.373	0.441	0.481	68.2	M 5
10	31.51	3.00	0.457	0.559	0.478	0.679	64.2	M 5
11	31.09	3.00	0.422	0.273	0.527	0.597	73.4	M 5
12	31.09	3.00	0.119	0.386	0.429	0.448	59.4	M 5
13	30.09	3.00	0.470	0.702	0.549	0.824	72.2	M 5
14	29.43	4.00	0.506	0.500	0.532	0.721	69.0	M 5
15	28.00	4.00	0.429	0.794	0.794	0.910	75.2	M 5
16	27.36	5.00	0.694	0.333	0.779	1.020	68.4	M 5
17	27.67	2.00	0.140	0.341	0.357	0.408	62.6	M 5
18	26.72	2.00	0.205	0.113	0.197	0.284	58.8	M 5
19	25.10	5.00	1.080	1.160	1.100	1.360	74.6	M 5

**Table 4.** Presumption formula of ground vibration propagation on KCALMAC plasma

구 분	PPV	PVS	신뢰수준
자승근 환산식	$37.94 \left(\frac{D}{W^{1/2}}\right)^{-1.4006}$	$46.46 \left(\frac{D}{W^{1/2}}\right)^{-1.4231}$	90%
	$43.63 \left(\frac{D}{W^{1/2}}\right)^{-1.4006}$	$53.45 \left(\frac{D}{W^{1/2}}\right)^{-1.4231}$	95%
일반식	$7.01 W^{1.0875} \cdot D^{-0.9670}$	$9.11 W^{1.0861} \cdot D^{-1.0036}$	90%
	$7.84 W^{1.0875} \cdot D^{-0.9670}$	$10.22 W^{1.0861} \cdot D^{-1.0036}$	95%



**Fig. 3.** Relation between PPV and square root scaled distance.



**Fig. 4.** Relation between PVS and square root scaled distance.

**지발당 전해질량 산출**

보안물건으로부터 이격거리에 따른 지발당 전해질량 산출은 PPV와 PVS에 대한 허용진동속도에 따라 신뢰수준 90%와 95%에 해당하는 자승근 환산식을 이용하여 산출하였으며 Table 5 및 Table 6과 같다.

Fig. 5는 최대진동속도를 고려한 허용진동속도와 보안물건 및 폭원과의 이격거리에 따른 지발당 전해질량의 계산도표이며, Fig. 6은 진동속도의 벡터 합을 고려한 허용진동속도와 보안물건 및 폭원과의 이격거리에 따른 지발당 전해질량의 계산도표이다.

**2.5 지발시차**

플라즈마 전해질의 분해속도는 상대적으로 예멸전 계열 폭약의 폭발속도에 비해 느릴 것으로 판단되므로 금번 시험에서의 지발시차는 40ms와 60ms로 변화시켜 기폭하였다. 지발시차는 진동증감, 발파효과, 비산에 대한 안전성 및 높은 폭음의 발생 등에 관계되므로 적절한 지발시차를 결정하는 것은 매우 중요하다. 금번에는 시험을 실시한 2가지 시차에 대해서만 프로그램을 이용하여 단발발파의 회당공수에 따른 진동 최대치와 유효 잔류진동치에 대한 이력시간의 분석

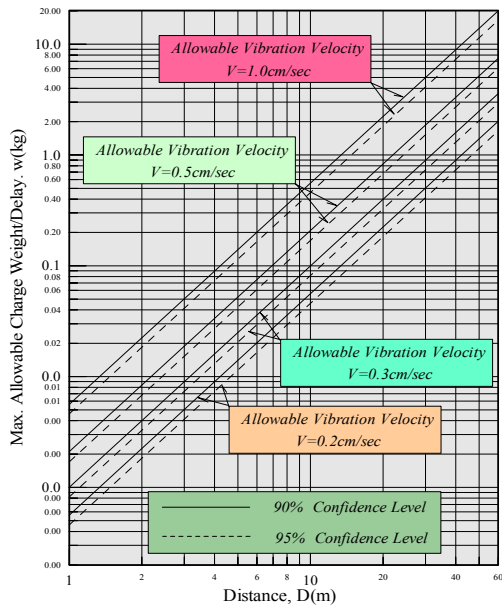


**Table 5.** The allowable vibration velocity by PPV the electrolyte volume per delay time to the distance from blasting position to preservation area

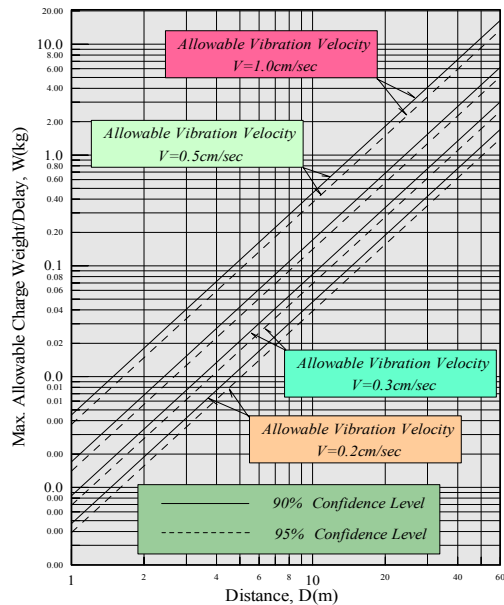
이격 거리 (m)	지발당 전해질량(kgf)								비 고
	신뢰수준 90%				신뢰수준 95%				
	0.2cm/s	0.3cm/s	0.5cm/s	1.0cm/s	0.2cm/s	0.3cm/s	0.5cm/s	1.0cm/s	
10	0.056	0.100	0.207	0.556	0.046	0.082	0.169	0.456	
20	0.223	0.399	0.827	2.224	0.183	0.326	0.677	1.822	
30	0.503	0.897	1.860	5.004	0.412	0.735	1.524	4.099	
40	0.894	1.594	3.307	8.897	0.732	1.306	2.708	7.287	
50	1.396	2.491	5.166	13.90	1.144	2.041	4.232	11.39	
60	2.011	3.587	7.440	20.02	1.647	2.938	6.094	16.40	

**Table 6.** The allowable vibration velocity by PVS the electrolyte volume per delay time to the distance from blasting position to preservation area

이격 거리 (m)	지발당 전해질량(kgf)								비 고
	신뢰수준 90%				신뢰수준 95%				
	0.2cm/s	0.3cm/s	0.5cm/s	1.0cm/s	0.2cm/s	0.3cm/s	0.5cm/s	1.0cm/s	
10	0.047	0.084	0.171	0.454	0.039	0.069	0.141	0.373	
20	0.189	0.334	0.686	1.816	0.155	0.275	0.563	1.492	
30	0.426	0.753	1.543	4.087	0.350	0.618	1.267	3.356	
40	0.757	1.338	2.743	7.265	0.621	1.099	2.252	5.966	
50	1.182	2.090	4.285	11.352	0.971	1.717	3.519	9.322	
60	1.703	3.010	6.171	16.35	1.398	2.472	5.068	13.42	



**Fig. 5.** Scaled graph of electrolyte volume per delay time(by PPV).



**Fig. 6.** Scaled graph of electrolyte volume per delay time(by PVS).

과 지발발파에서 지발시차 40ms와 60ms에 대한 이력곡선 및 적정 지발시차를 고찰하였다.

### 3. 고찰

#### 3.1 플라즈마 파암진동 속도

시험파암 현장에서 에멀전폭약을 사용하여 시험발

파를 실시한 결과와 플라즈마 전해질을 사용한 시험 파암 결과를 비교분석하기 위해 일정량의 폭약과 전해질을 기폭하였을 경우 이격거리에 따라 전파되는 예상 진동속도를 비교하면 Table 7과 같다.

Table 8은 지발당장약량(폭약, 전해질량) 0.125~2.00 kg을 사용하는 경우 폭원으로부터 약10~60m 이격거리에서 에멀전 계열 폭약의 발파진동은 칼막 플라즈

Table 7. Presumption formula on using emulsion explosives

구 분	PPV	PVS	신뢰수준
지승근 환산식	$327.11(D/W^{1/2})^{-1.5802}$	$374.16(D/W^{1/2})^{-1.5902}$	90%
	$347.11(D/W^{1/2})^{-1.5802}$	$394.16(D/W^{1/2})^{-1.5902}$	95%

Table 8. The comparison of vibration velocity between explosives and electrolyte (confidence interval 90%)

[단위 : cm/s]

이격거리 장약량	10m		20m		30m		40m		50m		60m		비고
	폭약	전해질	폭약	전해질	폭약	전해질	폭약	전해질	폭약	전해질	폭약	전해질	
0.125	1.663	0.352	0.556	0.133	0.293	0.076	0.186	0.050	0.131	0.037	0.098	0.029	PPV
	1.840	0.399	0.611	0.149	0.321	0.084	0.203	0.056	0.142	0.040	0.107	0.031	PVS
0.500	4.973	0.928	1.663	0.352	0.876	0.199	0.556	0.133	0.391	0.097	0.293	0.075	PPV
	5.540	1.071	1.840	0.399	0.966	0.224	0.611	0.149	0.429	0.108	0.321	0.084	PVS
1.000	8.600	1.508	2.876	0.571	1.516	0.324	0.962	0.216	0.676	0.158	0.507	0.123	PPV
	9.613	1.754	3.193	0.654	1.675	0.367	1.060	0.244	0.744	0.178	0.556	0.137	PVS
2.000	14.87	2.451	4.973	0.928	2.621	0.526	1.663	0.352	1.169	0.257	0.876	0.199	PPV
	16.68	2.872	5.540	1.071	2.907	0.601	1.840	0.399	1.290	0.291	0.966	0.224	PVS

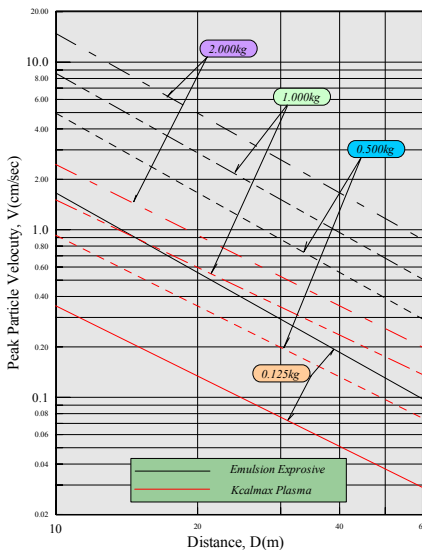


Fig. 7. Decrease trend of vibration velocity (confidence interval 90% by PPV).

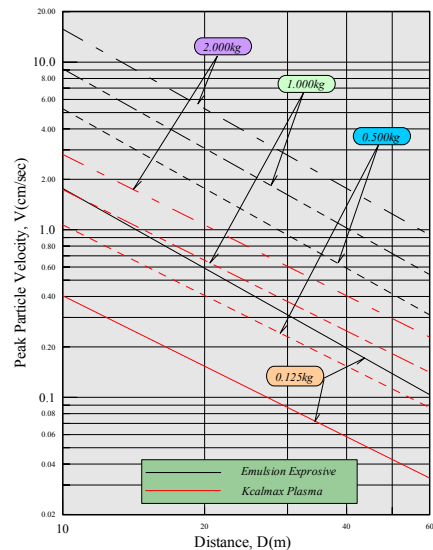


Fig. 8. Decrease trend of vibration velocity (confidence interval 95% by PPV).

마 전해질을 사용하는 경우에 비해 Fig. 7과 같이 약 3~6배 정도 높았다. 즉, 칼막플라즈마 파압은 에멀전 계열 폭약발파에 비해 진동의 감쇄효과가 크며, 이 경향은 Fig. 8에서 나타난 신뢰수준 95%의 경우도 유사하다.

한편, 지발시차 40ms와 60ms에 대한 지반진동의 차이는 그래프의 경향으로 미뤄볼 때 진동의 증감에 대한 차이는 발견하지 못했다. 그러나 지발당 전해질 capsule수가 증가 할수록 지발시차를 증가시키는 것이 바람직할 것으로 사료된다.

### 3.2 지발당 전해질량

에멀전 계열 폭약 지발당 0.125kg을 사용할 수 있

는 한계거리에 해당하는 플라즈마 지발당 전해질량을 PPV와 PVS로 구분하여 신뢰수준 90%와 95%를 기준으로 산출 비교하면 Table 9와 같다.

허용진동속도와 신뢰수준에 따른 이격거리별 지발당 전해질량을 PPV 기준으로 나타내면 Fig. 9와 같으며, PVS로 나타내면 Fig. 10과 같다. PPV를 기준으로 하는 경우는 PVS를 기준으로 하는 경우보다 지발당 전해질량이 증가하고 또 허용진동속도가 높을수록 지발당 전해질량이 증가하나 신뢰수준이 높을수록 지발당 전해질량은 감소하는 경향을 나타내고 있다. 그러나 허용진동속도가 높을수록 폭약의 사용 한계거리가 상대적으로 감소되어 그 거리에 해당하는 지발당 전해질량은 크게 증가하지 않는다. 따라서 보안물건

Table 9. Comparison of electrolyte volume per delay time

지발당 장약량 (kg)	허용 진동속도 (cm/s)	폭약사용 한계거리 (m)				지발당 전해질량 (kg)				비 고
		PPV		PVS		PPV		PVS		
		90	95	90	95	90	95	90	95	
0.125	0.2	38.2	39.7	40.4	41.7	0.82	0.72	0.77	0.68	
	0.3	29.6	30.7	31.3	32.3	0.87	0.77	0.82	0.72	
	0.5	21.4	22.2	22.7	23.4	0.95	0.83	0.88	0.77	
	1.0	13.8	14.3	14.7	15.2	1.06	0.93	0.98	0.86	

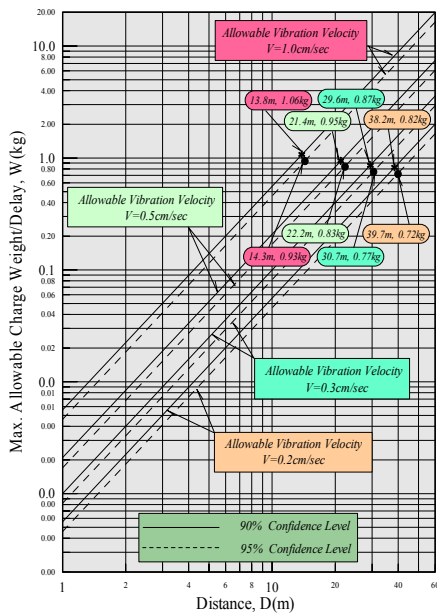


Fig. 9. scaled graph of electrolyte volume per delay time (by PPV).

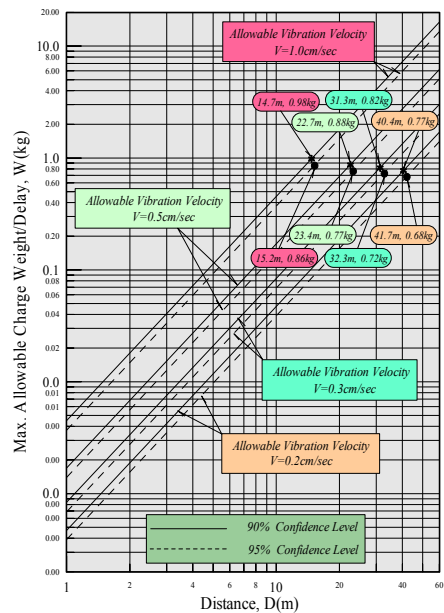


Fig. 10. scaled graph of electrolyte volume per delay time (by PVS).

주변에서 폭약과 병행하여 발파작업을 수행하는 현장에서 허용진동속도 0.2, 0.3, 0.5 및 1.0cm/s로 제어하는 경우 폭약을 사용할 수 있는 한계거리 이내에서 약 1.0kg 이하의 지발당 전해질량을 사용해야할 것으로 사료된다. 그러나 보안물건을 자유면 전방에 위치시키고 발파작업을 수행할 경우에는 지발당 전해질량을 이보다 증가시킬 수 있을 것이다. 한편 허용진동속도 0.2, 0.3, 0.5 및 1.0cm/s의 경우 폭약을 사용할 수 있는 한계거리 이상인 약 50m에서 각각 약 1.0, 2.0, 4.0 및 11.0kg의 지발당 전해질량을 사용할 수 있으나 발파에 의한 지반진동의 전파는 매질의 종류와 지질구조에 따라 다르기 때문에 발파현장에서 시험발파를 통해 적정 약량을 산출하여 사용하는 것이 안전한 것으로 판단된다.

**3.3 파암 폭음**

발파나 파암에 의한 폭음(소음, 발파풍)의 발생은

필연적인 현상이며, 발생된 폭음의 전파는 기상조건이나 지형에 영향을 받게 된다(양형식, 1992). 칼막 플라즈마 전해질을 사용한 시험파암 현장의 지형은 자유면 배면방향과 일부측면을 높은 산이 에워싼 형태이며 바람은 거의 없는 맑은 날씨였다.

**파암 소음**

칼막 플라즈마 전해질을 사용한 시험파암 결과(결정 계수가 0.7에 미치지 못했지만)와 에멀전 계열 폭약의 발파소음 예측식을 이용하여 지발당장약량(폭약, 전해질)에 따른 소음도를 비교하면 식 (5) 및 식 (6)과 같다.

- 발파소음예측식 : 
$$dB(A) = 90.8 - 11 \cdot \log(D/\sqrt[3]{W}) \tag{5}$$

- 파암소음결과식 : 
$$dB(A) = 85.6 - 13 \cdot \log(D/\sqrt[3]{W}) \tag{6}$$

**Table 10.** Assumption value comparison of blasting noise and plasmic noise

폭원과 이격거리(m)	10	20	30	40	50	60	70	80	비고	
소음도 dB(A)	0.15kg	76.8	73.5	71.5	70.2	69.1	68.2	67.5	66.8	폭약
		69.0	65.1	62.8	61.2	59.9	58.9	58.0	57.3	전해질
	0.30kg	77.9	74.6	72.6	71.3	70.2	69.3	68.6	68.0	폭약
		70.3	66.4	64.1	62.5	61.2	60.2	59.3	58.6	전해질
	0.50kg	78.7	75.4	73.4	72.1	71.0	70.1	69.4	68.8	폭약
		71.3	67.4	65.1	63.5	62.2	61.2	60.3	59.6	전해질
	1.00kg	79.8	76.5	74.6	73.2	72.1	71.2	70.5	69.9	폭약
		72.6	68.7	66.4	64.8	63.5	62.5	61.6	60.9	전해질
	2.00kg	80.9	77.6	75.7	74.3	73.2	72.3	71.6	71.0	폭약
		73.9	70.0	67.7	66.1	64.8	63.8	62.9	62.2	전해질

**Table 11.** Assumption value comparison of air pressure by blast

폭원과 이격거리(m)	10	20	30	40	50	60	70	80	비고	
폭풍압 dB(L)	0.15kg	133.8	126.6	122.4	119.4	117.0	115.1	113.5	112.1	폭약
		111.8	102.5	-	-	-	-	-	-	전해질
	0.30kg	136.2	129.0	124.8	121.8	119.4	117.5	115.9	114.5	폭약
		114.9	105.6	100.0	-	-	-	-	-	전해질
	0.50kg	138.0	130.8	126.5	123.5	121.2	119.3	117.7	116.3	폭약
		117.2	107.9	102.4	-	-	-	-	-	전해질
	1.00kg	140.4	133.2	128.9	126.0	123.6	121.7	120.1	118.7	폭약
		120.3	111.0	105.5	101.6	-	-	-	-	전해질
	2.00kg	142.8	135.6	131.4	128.4	126.0	124.1	122.5	121.1	폭약
		123.4	114.1	108.6	104.7	101.7	-	-	-	전해질

Table 10과 같이 지발당장약량(폭약, 전해질) 0.15~2.00kg을 사용하여 발파 또는 파암을 하는 경우 플라즈마 파암이 에멀전 계열 폭약발파에 비해 폭원으로부터 약 10~80m 범위의 동일한 거리에서 약 7.0~9.0dB(A) 정도 낮게 소음이 전파되는 경향을 나타내었다. 따라서 허용진동속도에 따라 칼막 플라즈마 지발당 전해질량을 사용하면 약 70dB(A) 이하의 소음이 보안물건에 전파될 것으로 판단된다.

**발파 폭풍압**

칼막 플라즈마 전해질을 사용한 시험파암 결과(결정계수가 0.7에 미치지 못했지만)와 에멀전 계열 폭약의 발파 폭풍압 예측식을 이용하여 지발당장약량(폭약, 전해질)에 따른 폭풍압을 비교하면 Table 11과 같다.

- 발파 예측식 :

$$dB(L) = 164.4 - 24 \cdot \log(D/\sqrt[3]{W}) \quad (7)$$

- 파암 결과식 :

$$dB(L) = 151.3 - 31 \cdot \log(D/\sqrt[3]{W}) \quad (8)$$

Table 11과 같이 지발당장약량(폭약, 전해질) 0.15~2.00kg을 사용하여 발파하는 경우 (칼막)플라즈마 파암이 에멀전 계열 폭약발파에 비해 전반적으로 동일한 거리에서 약 20~24dB(L)정도 낮은 폭풍압이 전파될 것으로 판단된다. 또한 허용진동속도에 따라 칼막 플라즈마 지발당 전해질량을 사용하면 약115dB(L) 이하의 폭풍압이 보안물건에 전파될 것으로 판단된다.

**3.4 암반 파쇄상태**

지발시차에 따른 암반파쇄상태 분석은 동일한 암반 상태에서 동일한 지발당 공수를 지발시차를 달리한 별도의 장소에서 여러 번 시험하여 분석하는 것이 적절하고 전해질 규모(량)에 따른 암반파쇄상태 분석 또한 마찬가지다. 그러나 금번 시험에서는 장소의 제한으로 이를 정량적으로 언급하기 어려우나 전체적으로 일반 폭약을 사용한 발파의 암반상태 보다는 다소 낮은 파쇄상태를 나타내었다. 따라서 일반적으로 계단식발파에서 암반파쇄상태에 영향을 주는 것은 시차보다는 기폭방식인 지발과 제발, 천공패턴(저항선과 공

간격, 파암공 배열) 등이므로 암반 파쇄상태에 대한 칼막 플라즈마의 연구와 시험은 더 진행되어야할 것으로 사료된다.

**3.5 플라즈마 전력충격파암기의 지발시차의 적정성**

단발발파에서 회당 1공, 2공, 3공, 4공 및 5공을 각각 발파를 한 결과, 진동의 최대진동은 전체적으로 기폭 후 약 21~24ms 범위에서 나타났고 유효 잔류 진동치는 기폭 후 각각 약 30ms, 41ms, 50ms 및 57ms에서 나타났다.

전해질 단발연결 개수에 관계없이 진동의 최대치가 되는 이력시간은 유사하나 단발연결 개수가 증가 할수록 유효 잔류 진동치의 출현시간은 늦어지는 경향을 나타내었다. 이것은 1회로에 연결된 전해질 수가 증가함으로써 동시기폭(동시 점화) 시간의 오차에서 기인될 수도 있으며 전해질의 분해속도의 차이가 요인이 될 수도 있다.

유효 잔류 진동치가 전해질 단발연결 개수 1~3개에서 유효 잔류 진동치가 기폭 후 약 41ms 이하였고, 4~5개에서는 약 50~57ms 범위이었다. 그리고 진동의 최대치는 기폭 후 약 21~24ms이므로 지발당 전해질 연결개수 1~3개 범위에서는 지발시차는 약 40~50ms, 4~5개 범위에서는 약 70~80ms 정도가 적절할 것으로 사료된다.

또한 발파진동의 환경적인 측면에서 보면 인체는 진동에 노출되는 시간에 따라 반응도가 다르게 나타난다. 즉 낮은 진동의 경우에도 진동 지속시간이 길게 되면 약간 높은 진동이 짧게 지속되는 경우와 같은 반응을 보일 수도 있다. 이와같은 인체반응을 고려하여 1회 지발횟수를 결정하는 것이 바람직하며 발파대상 암반이 경암에 가까울수록 지발당 공수와 지발시차를 감소시키는 것이 적절할 것으로 판단된다.

**4. 결론**

본 연구에서의 플라즈마 전력충격기에 지발시차를 적용하여 실험한 결과는 아래와 같다.

- 1) 플라즈마 파암진동의 신뢰수준 95%에 대한 상승근 진동추정식은 아래와 같다.

$$43.63 \left(\frac{D}{W^{1/2}}\right)^{-1.4006}(\text{PPV}) \quad 53.45 \left(\frac{D}{W^{1/2}}\right)^{-1.4231}(\text{PVS})$$

- 2) 플라즈마 파암과 에멀전 폭약의 예상 진동속도는 지발당장약량(폭약, 전해질량) 0.125~2.00kg를 사용하는 경우, 폭원으로부터 약10~60m 이격거리에서 에멀전 계열 폭약의 발파진동은 칼막 플라즈마 전해질을 사용하는 경우에 비해 약3~6배 정도 높은 것으로 나타났다.
- 3) 지발당 전해질량은 PPV를 기준으로 하는 경우는 PVS를 기준으로 하는 경우보다 지 발당 전해질량이 증가하는 경향이 있으며 허용진동속도가 높을수록 지발당 전해질량 이 증가하나 허용진동속도가 높을수록 폭약사용 한계거리(폭약 0.125kg를 사용할 수 있는 보안물건으로부터의 이격거리)가 상대적으로 감소되어 그 거리에 해당하는 지발 당 전해질량은 크게 증가하지 않는다.
- 4) 플라즈마 파암 소음은 지발당장약량 0.15~2.00kg를 사용하여 파암(발파)하는 경우 플라즈마 파암이 에멀전 계열 폭약발파에 비해 폭원으로부터 약 80m 이내의 동일한 거리에서 약 7.0~9.0dB(A) 정도 낮은 소음이 전파될 것으로 예상된다.
- 5) 플라즈마 파암 폭풍압은 지발당장약 0.15~2.00kg을 사용하여 파암(발파)하는 경우 칼 막 플라즈마 파암이 에멀전 계열 폭약발파에 비해 전반적으로 동일한 거리에서 약 20~24dB(L)정도 낮은 폭풍압이 전파될 것으로 예상된다.
- 6) 지발시차는 전해질의 지발당 연결 capsule 개수 1~3개 범위에서는 지발시차는 약 40~50ms, 4~5개 범위에서는 약 70~80ms 정도가 적절할 것으로 사료된다.
- 7) 플라즈마 파암에 의한 암반 파쇄상태는 금번 시험 장소의 제한으로 암반파쇄상태를 상황에 따라 정량적으로 언급하기 어려우나 전체적으로 일반 폭약을 사용한 발파에 비해 낮은 효과를 나타내었다.

### 참고문헌

1. 건설교통부, 2006, 도로공사 노천발파 설계 시공지침, 건설교통부, p. 11.
2. 기경철, 김일중, 2002, 산화인을 위한 발파공학, 동화기술, 서울, p. 317.
3. 양형식, 1992, 발파진동학, 구미서관, 서울, p. 109.
4. 정일록, 1999, 소음진동학, 신광문화사, 서울, pp. 262-272.
5. (주)룩스코리아, 2008, 칼막플라즈마 암파쇄에 적용한 전력충격기의 적정 지발시차 및 암파쇄 검토보고서, pp. 25-33.



**원 언 호**

원앤비 기술사사무소 대표

Tel : 031)487-1271  
E-mail:yhwon@paran.com



**강 추 원**

조선대학교 에너지자원공학과 교수

Tel : 062)230-7117  
E-mail:cwkang@chosun.ac.kr



**김 일 중**

엔-토비 기술사사무소 대표

Tel : 063)277-3696  
E-mail:intob@show.co.kr