

다목적연구용원자로 굴착을 위한 시험발파평가 및 조사후시험건물의 발파에 의한 진동영향평가에 관한 연구

유 봉, 김 응식, 최 강봉

(Study on Test Blasting Evaluation for KMRR Excavation and
Vibration Evaluation of PIBF Subjected to Test Blasting)

1. 개요

조사후시험시설 (Post Irradiated Examination Facility, PIBF)은 내진범주 1급 구조물로서 현재 각종 실험 및 연구가 진행중인 원자력 안전 관련시설물이다. 한편 이 건물로부터 30m ~ 120m 정도 떨어져 있는 다목적연구로 (Korea Multipurpose Research Reactor, KMRR) 및 조사제시험시설 (Irradiation Material Examination Facility, IMEF)의 건조사업을 위하여 기초압반의 굴착작업을 수행할 경우 발파작업에 따른 그 진동 및 폭풍압영향이 염려되어, 그 안전성 평가를 위하여 시험발파를 수행해야 할 필요가 제기되었다. 우선 운전중인 원자력 안전 시설물에서의 발파에 따른 진동허용 기준을 설정하고, 둘째로 거리에 따른 폭발량을 경험식에 따라 잠정 결정 한 후, 셋째로 시험발파에 의한 진동 측정용 수행하여 그 영향을 평가 하고, 끝으로 이에 따라 거리별 제한 폭발량을 결정 한 후 실제 본발파에 적용하고자 한다. 이로써 운전중인 원자력 안전관련시설물인 PIBF의 안전 운전을 도모하고 KMRR 및 IMEF 시설의 건조를 원만 하게 이룰 수 있을 것이다.

2. 진동허용기준

발파진동의 허용기준은 발파진동의 크기를 나타낼 수 있는 변위, 속도 및 가속도를 결정 하여야 한다. 이것은 지반진동을 단순진동으로 고려할 경우 최대진폭에서의 변위(D), 속도(V), 가속도(A) 세 성분과 주파수(f) 사이에 다음 식이 성립한다.

$$V = 2\pi fD \quad (1)$$

$$A = \frac{2\pi fV}{l} \quad (2)$$

$$f = \frac{1}{T} \quad (3)$$

여기서 T는 주기를 나타낸다. 한편 발파진동에 대한 규제기준은 변위, 또는 가속도보다는 진동속도를 결정하는 것이 일반적이다[1]. 이것은 가속도를 기준으로 하는 지진의 경우와는 달리 발파진동의 진동주파수가 지진의 주파수, 1 ~ 33Hz 보다 훨씬 큰 40Hz ~ 200Hz 정도이므로 가속도를 기준으로 피해정도를 표시하기에는 부적당하여 속도로 피해정도를 나타내게 된다.

* 한국원자력연구소
** 한국원자력안전기술원
*** 한국원자력안전기술원

지하철 건설을 위한 도심지의 발파에서는 진동허용속도기준을 0.5~0.7cm/sec로 엄격히한 경우도 있다[2][3]. 또한 문화재근처에서의 발파에 대한 진동허용기준은 더욱 엄격하여 0.158~0.2cm/sec로 제한하고 있다[4]. 그러나 원자력발전소 및 원자력관련 안전시설의 발파에 대한 진동허용기준은 현재 까지 미설정된 상태이며 특히 운전중에 있는 민감한 계기류 및 회전기기류에 대한 발파허용기준을 미국 광무성에서 추천한 안전한계인 최대 제한속도 5cm/sec로 결정하기에는 안전 및 운전상에 큰 문제를 유발할 수 있다[1]. 이에 따라 운전중인 원자력 발전소나 PIBF 시설은 허용최대 가속도인 안전 정지지진 (Safe Shutdown Earthquake, SSE) 0.2g 및 그에 대한 50%로서 운전기준을 정하고 있는 운전기준지진 (Operating Basis Earthquake, OBE) 0.1g에 따라 내진범주 1급 구조물로 설계 되어 있으므로 발파에 대한 허용기준을 PIBF 건물 기초에서 운전기준에 따른 OBE 0.1g에 안전 여유도를 주어 그 70%인 0.07g로 결정하고 지표면에서는 건물외벽에서 0.1g로 제한하여 각각 발파허용기준으로 설정하였다.

아울러 진동주파수를 100Hz로 가정하여 식 (2)에 따라 입자속도를 PIBF 기초에서 0.109cm/sec 이하로 설정하였다. 표 1은 PIBF 시설에 대한 발파허용기준을 나타내고 있다.

표 1. PIBF 발파허용 기준

	진동가속도	0.07g
PIBF 기초면 (지하 10m)	진동 속도	0.109cm/sec
PIBF 지표외벽	진동가속도	0.1g

3. 시험발파 방법 및 제한폭발량

3.1 시험발파 방법

시험발파를 위해 $\phi 38\text{mm}$ bit를 사용하여 암반에 천공길이 약 2.4m, 천공간격은 0.7m X 0.7m로 19개씩 1개조로 뚫어 그림 1과 같은 10개조 시험발파 배열을 형성 하였다. 그림 2-a 및 2-b는 A-A 및 B-B에서의 단면을 나타내며 PIBF 시설로부터 70m 부근에 길이 약 4m 정도의 Trench가 형성되어 있음을 알 수 있다. 한편 원자로 건물의 기초는 주로 암반으로서 Slightly Weathered (SW) Granite와 Moderately Weathered (MW) Granite가 발달되어

있으며, IMBF 기초는 주로 MW Granite와 Highly Weathered (HW) Granite로 구성되고 RI 건물의 기초는 주로 HW Granite가 발달되어 있다. 또한 RI 및 IMBF와 PIEF 시설사이에는 Clay 층이 표면에 발달하여 시험발파 이전에 굴착작업이 수행되어 있어서 상기의 Trench를 형성하고 있었다.

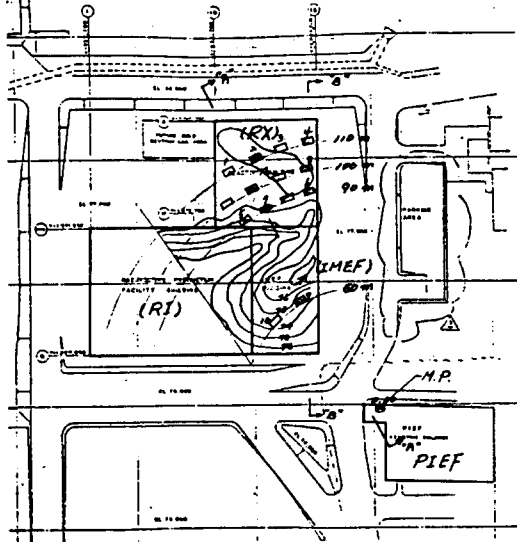


그림 1 KMRR 발파원위치 및 측정점(M.P) 배치도

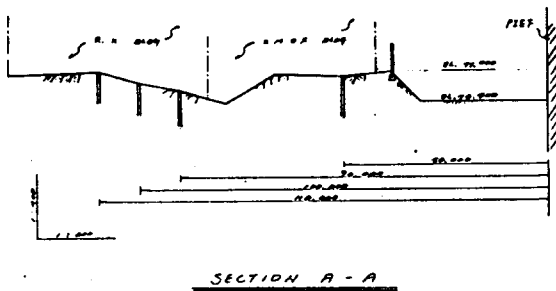


그림 2-a 대표적인 발파원 및 측정점의 단면도

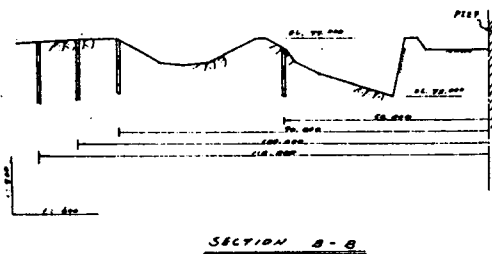


그림 2-b 대표적인 발파원 및 측정점의 단면도

3.2 제한폭발량

시험발파를 위한 초기 제한폭발량은 미광무성식에 따라 부록 1과 같이 구하였다[5]. 시험발파는 89년 3월 16일에 1차 ~ 4차의 내차래와 89년 3월 17일의 5차 ~ 10차의 모두 10회에 걸쳐 수행되었다. 특히 5차 및 6차 발파에서는 1차 ~ 4차 발파에 대한 진동측정에서 측정가속도가 허용기준내에 있어 이때 측정된 고유진동수를 사용하여 제한폭발량을 부록 2와 같이 다시 계산하여 110m에서 5.18Kg이던것을 90m에서 5.18Kg으로 증가시켰으며, 같은 방법으로 7차 및 8차때에도 5차 및 6차때의 제한폭발량인 90m에서 5.18Kg을 10Kg으로 110m에서 13Kg으로 각각 늘렸으며 또한 9차 발파때의 50m에서 3.4Kg을 10차 발파에서도 50m에 5Kg으로 늘렸다.

이처럼 시험발파때 측정치가 허용기준을 만족하고 또한 피해보고가 없는 경우 측정된 고유진동수를 이용하여 미광무성식에 폭발량을 증가시켜 본발파때 발파작업의 효율을 높일수 있도록 사용될 제한폭발량을 결정하였다. 표 2는 10차에 걸쳐 수행된 시험발파 및 부록 2의 계산결과에 근거하여 결정된 본 발파를 위한 제한폭발량을 나타낸다.

표 2 시험발파에 따른 KMRR 제한폭발량 산정

거리 (m)	화약장전량 Kg
110	14.73
100	12.34
90	10.0
80	7.9
70	6.04
60	5.0
50	4.99
30	1.79

4. 진동측정 및 분석

4.1 진동측정

시험발파시 PIEF시설에서의 진동측정은 지하에서 가장 취약하다고 예상되는 남유리가 위치한 PIEF 지하 10m 기초와 발파원으로부터 가까워 진동크기가 가장 클 것으로 예측되는 PIEF 지표면 건물내벽의 두장소에서 수행하였다. 측정 및 분석에 사용된 장비는 표 3과 같고 그림 3은 측정 계통도를 나타낸다.

표 3. 측정장비 및 제한

번호 (그림2)	장비명	모델	수량	비고
1,2,3	가속도계 *	B&K 4383	3	설치는 Wax이용
4	3축속도계		1	
5	전하증폭기	B&K 2635	6	
6	속도기록기 **	VM-12B	1	
7	2CH FFT	SP 380-2	1	
8	주파수분석기	B&K 7005	2	지표면 및 지하
9	4CH 자기 테이프기록기	HP 7470A	1	지하

* 표준연구소 장비
** 현대건설 장비

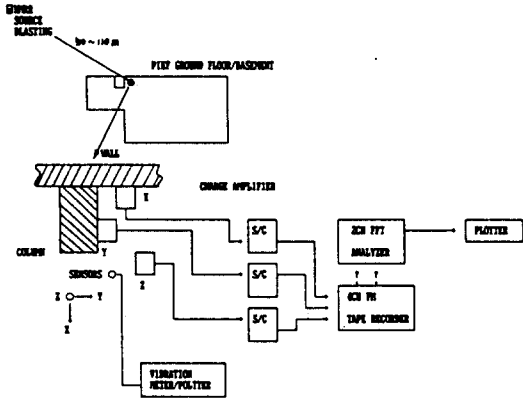


그림 3 지동 측정계통도 (GROUND FLOOR)

지하 10m 기초에서는 기초바닥의 벽면중 발파원 방향과 일치하는 것을 X축, 발파원 방향의 수직방향 Y축, 기초바닥에서 수직방향 Z축으로 하여 세방향에 대해 측정하였다. 지표면 건물내벽에서는 지표바닥의 내벽중 발파원 방향과 일치하는 것을 X축, 점선 방향을 Y축 그리고 지표바닥의 수직방향 Z축으로 하여 세방향에 대해 각각 측정하였다. 또한 현 대건물 상층비인 진동속도계로 Z축에 대한 속도로서 지표면에서 동시에 측정하였다. 다른 두곳에서는 측정하기 때문에 발파시점을 동시에 측정 가능하도록 하였다. 그런데 1차 부터 8차 발파까지는 실제 운전중인 PIBF 시설에 대하여 수행하였으나 지표면과 지하층 사이에 설치된 송풍기의 회전으로 인한 back ground noise가 크게 나타났다. 그래서 9차 및 10차 발파에서는 발파중 back ground noise를 줄이기위해 송풍기를 정지한 상태로 측정하였다.

4.2 분석

Tape Recorder에 의해 기록된 진동신호는 FFT Spectrum Analyzer를 이용하여 측정 지점별 가속도시간기록으로부터 최대 가속도를 결정하고 이를 주파수 영역으로 변환하여 중요 주파수영역을 측정하였다. 또 가속도시간기록을 속도시간기록으로 변환하여 속도크기를 구하였다. 표 4는 PIBF 시설의 지하10m 기초면 및 지표면 건물내벽에서의 응답결과를 나타내 보이고 있다.

한편 처음 실시된 1차 및 2차 발파에 대한 기록은 장비조작의 미숙으로 결과를 알지 못하였으며, 그후의 3차 ~ 10차까지의 결과에서도 지표면에서의 Y방향에 대한 결과는 Tape 기록기의 채널 고장으로 수록되지 못하여 아쉬운 결과를 남겼다. 각 발파에 대한 진동측정기에 의한 가속도 및 속도파형과, 진동속도계에 의해 측정된 속도파형 중에서 그림 4는 대표적인 가속도파형 및 주파수응답을 나타낸다.

표 4 KMRH 시험발파에 대한 PIBF 시설의 응답결과표

	1969. 3. 16					1969. 3. 17					비고
	1차	2차	3차	4차	5차	6차	7차	8차	9차	10차	
1. Source (at)	100	100	100	100	50	50	50	100	50	50	
2. 파형 (kg)	5.18	5.18	5.18	5.18	5.18	5.18	30.8	13.0	3.4	5.0	
3. Ground 10 Accel (g) - 1 dir - 1 dir			0.062 0.027	0.056 0.021	0.0475 0.024	0.0427 0.021	0.0234 0.015	0.0204 0.023	0.0207 0.011	0.0257 0.014	
2) Velocity (cm/sec) - FFT (Integrated) - Calculated - Measured (YB, dir)			0.051 0.024	0.050 0.021	0.041 0.024	0.033 0.021	0.021 0.01	0.021 0.01	0.025 0.022	0.027 0.022	1-dir Horizontal direction
3) Frequency (Hz)			100	75	100	200	100	200	185	100	
4. Resonant Accel. (g) - 1 dir - Y dir					0.028 0.023	0.040 0.0172	0.026 0.013	0.0262 0.021	0.025 0.018	0.028 0.012	

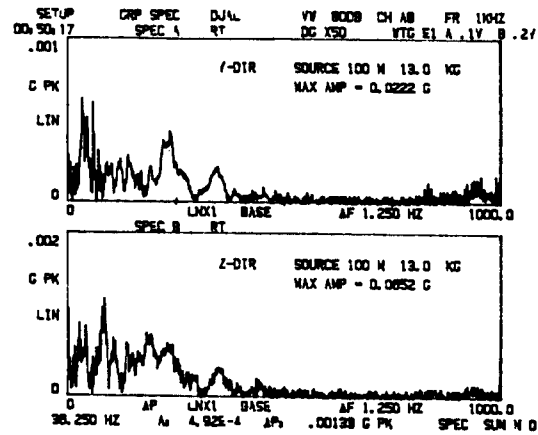
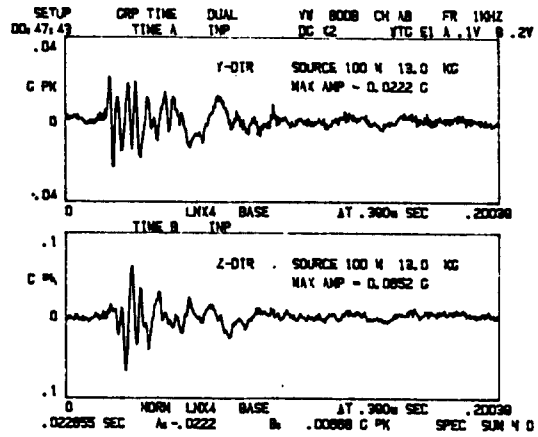


그림 4 지하기초면에서의 8차 시험발파시 Y 및 Z 방향 가속도파형 및 주파수응답

5. 평가 및 고찰

계산에 의한 거리에 따른 폭발량 산출하고 이에 따라 계산식 및 화약량과 거리에 대한 진동크기의 상관관계를 알기 위하여 1차 ~ 6차에서는 동일한 폭발량 5.18kg에 대해 서로 다른 두거리 110m 및 90m에 대한 진동크기를 비교하였다. 발파 거리가 먼 110m에서의 가속도가 90m에서의 가속도보다 더 큰 0.062g로 나타났으며 진동수는 160~200Hz 정도였다. 7차 발파에서는 6차와 거리가 같은 90m에 대해 폭발량은 거의 두배인 10kg으로 발파했을 경우에도 Z 방향의 진동가속도는 더 작게 나타났다. 시험발파중 가장 가까운 거리인 50m 지점에서 시험발파인 9차 및 10차의 경우, 계산에 의한 폭발량 3.4kg에 의하여 발파시 지면 가속도는 0.027g, 기초면 가속도는 0.035g 허용기준보다 낮아 화약량을 증가시킨 5kg에 의하여 다시 발파하였으며 이때도 지면가속도는 0.026g, 기초면 가속도는 0.026g 허용기준을 만족하였다. 일반적으로 토양이 동질성인 경우 발파에 대한 진동크기는 거리에 반비례하고 폭발량에 비례하나 상기에서처럼 KMRH의 시험발파에 대한 상관관계는 구하기 어려웠다. 이는 발파원과 측정점사이의 지표면에서의 암반이 고르게 분포되지 않았다고 생각되며

또한 Trench가 불규칙하게 놓여있어 같은 거리에서도 발파위치의 변화에 따른 표면파의 전달이 Trench 영향을 크게 받은 것으로 사료되었다. 특히 발파시 발파원과 측정점사이에 Trench가 없었던 발파위치 3, 4, 6, 9에서의 진동가속도가 크게 나타나 Trench는 표면파의 영향을 줄일 수 있는 역할을 하고 있음을 알 수 있었다. 전설계 본발파시에는 발파원으로부터 PIBF시설 전면위치에 Trench를 5m 정도로 굴착하여 발파에 대한 진동을 최소화하도록 추천하였다.

6. 결 론

운전중인 원자력 안전관련시설물인 PIBF 시설에 발파에 따른 영향을 주지 않도록 발파허용기준을 PIBF 건물기초에서 0.07g로 결정하고 이때 고유진동수는 100Hz로 가정하여 속도는 0.109cm/sec로 각각 결정하였으며 지표면 건물벽에서는 0.1g로 결정하였다. 미광무상경험식에 따른 폭발량을 산출하고 그에따라 10차에 걸친 시험발파에 대한 진동허용기준을 모두 허용기준치이내에 들어갈 수 있도록 발파허용기준을 만족하였다. 발파에 대한 진동영향은 발파원 거리 및 폭발량 증감, 또한 발파원 측정점사이에 토양특성에 영향을 받으며 특히 표면파의 전달을 막아주는 Trench의 영향을 많이 받는다는 것을 알 수 있었다. 시험발파중 PIBF 시설내의 운전중인 기기나 구조물의 피해는 보고된 적이 없었으므로 거리 50m 이상은 7차 시험발파에 대한 제한폭발량기준을 따르고 거리 50m 이하는 10차 시험발파를 기준으로 하여 표 3의 제한폭발량을 위하 기준으로 발파를 수행할 경우 PIBF 시설은 아무런 피해가 없을 것으로 판단된다. 따라서 굴착작업의 효율을 높이기 위해 화약량을 증가시키고자 할 경우는 가빈 화약량에 대한 시험발파 및 진동측정을 실시하여 원자력안전 관련 시설물에 영향이 없음을 만족시키는 경우에만 하여 허용될 수 있다.

감사의 글

장비를 임대해주고 조언을 해주신 표준연구소의 임병덕 박사에게 감사드리며 진동 측정에 협조해 주신 PIBF 시설요원과 KMRR 발파작업에 직접 관여하신 현대건설 관계인에게도 아울러 고마운 마음을 표하는 바이다.

참고문헌

1. 김재국, 산업화약과 발파공학, 1986.8, 서울대학교 출판부.
2. 발파진동식 확립과 제어발파 지침결정을 위한 연구보고서, 1983.4.30, 서울특별시 지하철공사.
3. 허진, 도심지발파작업에 따르는 폭파진동 기초해설 연재 (1, 2, 3)
4. 채수연, 동대문의 현상진동과 방진대책 (II)
5. 시험발파계획서, 1989.3.13, KMRR 건설 1차 및 IMBF 굴착공사 현대건설(주) 작업소

부록 1 초기 제한 폭발량 산출 [1]

$V = K (D/W^{0.5})^{-1.5}$ 여기서 V = 입자속도 (cm/sec)
 K = 상수
 D = 거리 (m)
 W = 화약량 (Kg)

1. 우선 실험식에 의해서 K 값을 구한다.
 $K = B_i (R_i \times S_c + 40)$
 $B_i = \text{화약계수 (합수폭약 : 0.8)}$
 $R_i = \text{암석계수}$
 $S_c = 1,300 \text{ Kg/cm}$
 $= 0.8 \times (0.0206 \times 1,300 + 40)$
 $= 53.424$

2. MAX. PARTICLE VELOCITY를 결정하기 위해 입자의 가속도를 0.10g (100 Gal)로 제한하면 주파수가 100Hz 일때의 V는 $A = 2\pi fV$
 $100 \text{ Gal} = 2\pi \times 100 \times V$
 $V = 0.159 \text{ cm/sec}$ 로 허용치인 2.5 cm/sec 를 만족시킨다.

$V = K (D/W^{0.5})^{-1.5}$ 에서
 $0.159 = 53.424 \times (D/W^{0.5})^{-1.5}$
 $D/W^{0.5} = 10^{1.634} = 48.328 - (A)$
 D = 30, 50, 60, 70, 80, 90, 100 및 110m 일 경우의 화약량을 산출하면 아래의 표를 얻을 수 있다.

DIS-TANCE (m)	WEIGHT (Kg)	VELO-CITY (cm/sec)	ACCBLER-ATION (Gal)	CYCLE (Hz)
30m	0.38	0.159	100 Gal	100Hz
50m	1.07	"	"	"
60m	1.54	"	"	"
70m	2.09	"	"	"
80m	2.74	"	"	"
90m	3.46	"	"	"
100m	4.28	"	"	"
110m	5.18	"	"	"

부록 2 시험발파에 의한 제한폭발량 산출
 시험발파시 측정된 고유진동수를 이용하여 각 거리에 따른 폭발량을 산출하면 아래와 같다.

	SOURCE 90m 에서 10Kg 장약기준	SOURCE 50m에서 5Kg 장약기준
f(Hz)	180 Hz	180 Hz
V (cm/sec)	$0.1 \times 980 / 2\pi \times 180 = 0.087$	0.087
K	$0.087 / (90 / 10^{0.5})^{-1.5} = 13$ $= 1.454255$	$0.087 / (50 / 5^{0.5})^{-1.5} = 9$ $= 1.349512$
폭발량 거리	W(Kg)	W(Kg)
110m	14.73	24.19
100m	12.34	19.79
90m	10	16.19
80m	7.9	12.79
70m	6.04	9.79
60m	4.44	7.19
50m	3.08	4.99
30m	1.11	1.79