

제2장 진동측정 및 분석기법

2.1 진동속도에 영향을 미치는 요소

2.1.1 발파효과에 의한 영향

저항선과 장약량과 관계되는 것으로 두 가지 요소가 적절했을 때 즉 표준장약일 때, 장약량에 비해 저항선이 큰 경우의 발파, 즉, 약장약일 때에는 진동이 표준장약보다 크지만 반대로 장약량에 비해 저항이 작은 경우의 발파, 즉, 과장약일 때에는 진동이 표준장약일 때보다 크지 않다고 해석한다. 전자는 극단적인 경우로 탄성파탐사의 발파원으로서의 발파가 있다. 또 후자는 극단적인 경우로 발파가 있다. 그러나 적절한 발파 즉, 표준발파란 개념상으로는 알고 있지만 실제로는 해석상의 문제가 대단히 어렵다. 약장약의 발파의 진동은 처음부터 표준장약보다 크다고 알지만, 어떤 목적하에서는 충분히 적절하다고 할 수 있는 경우가 있다.

따라서 통상적인 의미에서 파쇄를 위한 발파라는 관점에서 보면, 과·약장약 모두 의미는 있지만, 지반진동에 의한 피해가 우려되는 지역에서는 역설적이긴 하지만 약장약보다 오히려 약간 과장약하는 것도 의미가 있고, 소음이나 비산으로 인해 피해가 우려되는 지역에서 약간의 약장약도 의미가 있다.

2.1.2 지반조건과의 관계

구조물이나 사람은 지표에 있으므로 지표에 전파되는 진동파에 주로 영향을 받게 되며 따라서 지표중의 암반이나 표토는 진동값에 큰 영향을 주게 된다.

표토는 암반보다 진동값을 증폭하는 성질이 있으며 또한 표면파는 실체파에 비해서 진동

의 감쇠작용이 낮다.

이러한 경우 표면파는 자연지진 등과 같은 성질의 저주파 진동을 발생시켜 표토상에 있는 일반 가옥에 큰 손상을 줄 수도 있다.

표 2.1 매질 임피던스와 변위 진폭과의 관계(Aptikaev)

측정개소 번호	매질임피던스 ρ_e (g/cm ³ , km/s)	$\frac{(\rho_e)_1}{(\rho_e)_i}$	변위진폭 $A(u)$	$\frac{A_1}{A_i}$
1	14.5	1	120	1
2	4.4	3.3	400	3.3
3	1.25	11.6	1500	12.5
4	1.75	19.5	2200	18.3

즉, 매질 임피던스가 적어지면 변위 진폭은 반대로 커진다. 똑같은 폭약량과 거리에도 불구하고 암반 중에서의 진동속도와 지표에서의 진동속도가 서로 다른 것은 지반조건이 서로 다르기 때문이며 심한 경우 10배 이상의 차이가 나는 경우도 있다.

그리고 견조한 암반에 비하여 물로 포화된 암반은 2~2.5배, 물속에서는 5배, 점토층은 3~4배로 진동값이 커진다.

수진점(受振点)의 지반 상하의 차이에 의해 변하는 요소를 B 라고 하고, 견고한 암반의 표면에서 수진경우를 1이라고 한다면, 암반 위에 표층이 실렸을 경우에는 $B > 1$ 이 되고, 표층의 두께가 커지고 연약질이 됨에 따라 B 값은 커진다. 또한 지하에 굴착된 갱도 벽면인 경우에는 갱도의 지름이 어느 정도 이상으로 커지면 자유표면상의 것과 큰 차이가 없게 되고, 견고한 암반 상에서의 것과 거의 같게 생각된다. Boring hole 중에 한 수진점인 경우에는 표면이 없는 지중 진동치라고 생각되어 $B < 1$ 이 된다.

지표가 암반이 아니라 풍화층·표토층이 그 위에 얹혀있을 경우에는 일반적으로 진동은 증폭되고, 진동 주파수는 낮은 성분의 것이 탁월하며, 수평방향의 진동 성분이 커지는 경향이 있다. 진동이 어느 정도나 크게 될 것인가는 표층의 두께와 H 와 그의 연질도에 따라 달라진다. 암반상이나 암반 내에 설치된 기존 구조물(댐, 터널)에 대한 근접 발파의 진동 영향을 검토할 경우에는 거의 발파종류만을 기초로 해도 좋지만, 가옥 등에 대한 공해적인 측면에서는 그 지반 상황의 요소가 큰 비중을 차지하므로 우선 그 지역의 지반 상황조사를 할 필요가 있으며, 그 결과에 의해 증폭도를 검토하고 시험 발파를 통해 확인하는 순서를 취하는 것이 바람직하다.

실측치를 기초로 한 대략적인 경향은 두께가 2m 이내라면 $B \leq 2$, 2~10m라면 $B = 2 \sim 5$ 와 같다.

단, 표층이 특별히 연질일 경우에는 $B = 10$ 정도가 될 때가 있다. 또한 암반 표면과 암반

내부에서의 진동치를 비교하면 후자는 전자의 1/2 정도일 때가 많다. 단, 여기서 말하는 암반내부란 자유표면이 없는 암반 중이란 것이며, 암반 내에 있는 공동일 경우에는 그 지름이 크게 됨에 따라 표면의 어떤 암반상의 경우와 큰 차이 없이 되므로 단순한 비교는 할 수 없게 된다.

2.1.3 폭약의 종류에 따른 경우

폭약이 폭발할 때에 기폭시부터 최고 압력시까지 도달되는 시간은 화약의 종류마다 다르며 이 값이 짧을수록 진동값과 주파수가 커진다고 한다. 따라서 폭속이 큰 폭약은 그 압력의 최고치에 도달하는 시간도 짧으므로 진동 값과 주파수도 커진다. 반대로 폭속이 낮은 폭약은 진동값과 주파수도 적어지게 된다.

따라서 저폭속 폭약을 이용하는 쪽이 진동 감소 효과를 기대할 수 있지만 이 경우 파쇄효과가 같은 정도로 양호한 것은 아니다. 즉, 발파효과가 같으려면 약량을 증가시켜야 하기 때문에 비교의 대상으로 할 수는 없다.

2.2 시험발파

시험발파는 2자유면을 갖는 암석의 저항선을 달리하여 발파한 결과 파쇄암석의 크기, 채석량, 비산정도, 안전율을 고려하여 가장 적당한 것을 표준발파로 하여 암석의 암석계수와 장약계수 산정하기 위한 자료를 얻기 위한 목적이다.

시험발파는 폭풍압과 발파현장의 지반운동에 대한 설계용 감쇠관계 특성을 제시하기 위해 수행한다. 이러한 관계는 지질이나 발파실무상의 변화 때문에 프로젝트마다 다양하다. 시험발파는 사업초기에 민원발생소지가 있을 것으로 예상되거나 사업도중에 민원발생으로 인해 실시하는 경우가 대부분이다.

또 발파기술자가 암반의 특수성(절리, 인장강도 등)에 전반적으로 익숙해지기 전에 실행될 수도 있다. 그러므로 시험발파 보고서에는 계측된 감쇠관계와 함께 차후에 계속할 측정 결과로 수정할 수 있는 방법도 포함해야 한다.

발파폭풍압과 지반진동의 감쇠는 측정 장소 단독의 성질은 아니다. 지질상태에 많이 좌우되기도 하지만 발파공의 배열에도 크게 좌우된다.

동일발파에 대해 광범위하게 다른 환산거리에서 최대입자속도를 측정하기 위해 여러 개의 발파진동 계측기를 사용해야 한다. 그렇게 하여 모든 발파변수들을 다양하게 유지할 수 있고 계측결과는 거리와 지발당 장약량의 영향으로 나타내게 된다. 물론 진동 계측기는 지

질상태가 일정한 한 선상에 배열해야 한다. 즉, 그 선은 토양의 두께가 일정하고 단층과 같은 거대한 지질학적 불연속면을 가로지르지 않아야 할 것이다.

2.2.1 발파설계 개요

발파설계는 굴착되는 암반 및 주변지질 특성, 지장물(보안물건)의 위치 및 종류, 발파에 의한 환경에 대한 영향 등 현장조건에 따라 제한 조건이 발생하며 이러한 각각의 조건들에 대한 충분한 검토와 그에 적절한 시공방법을 고려하여 발파효율이 극대화 되도록 이루어져야 한다. 이를 위해 발파설계 담당자가 공사 노선을 수시 답사하여 시공조건과 환경조건이 발파설계에 충분히 반영되도록 해야 할 것이다.

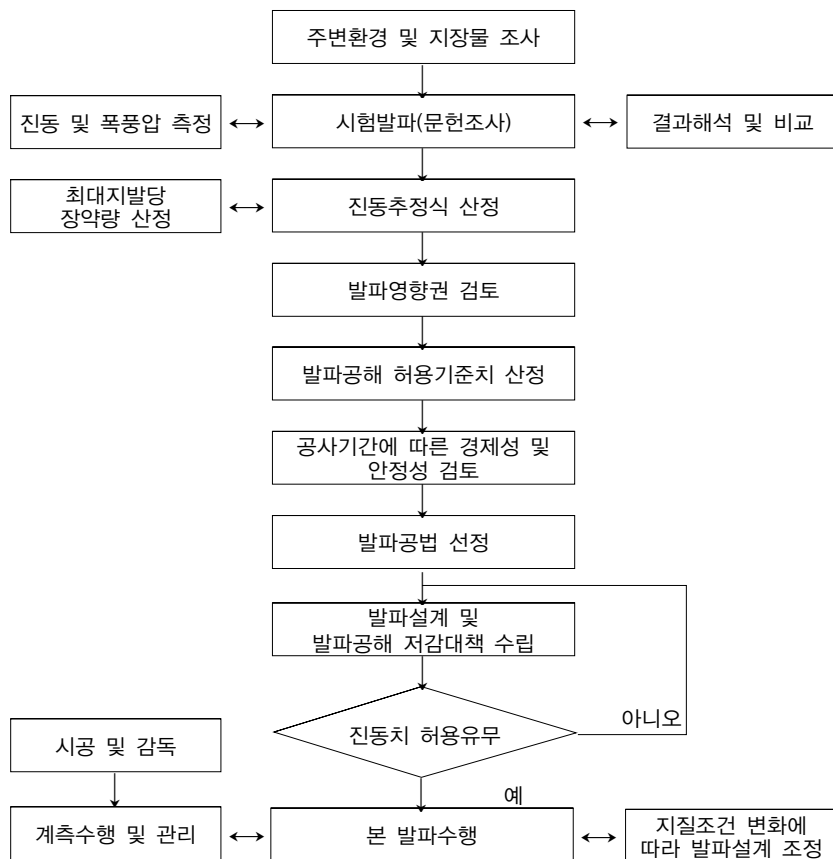


그림 2.1 발파설계 단계별 절차 및 내용

2.2.2 발파진동식의 예측

$$V = K(D/W^b)^n \quad (2.1)$$

여기서, V : 지반진동속도(cm/sec)

K : 입지상수

D : 폭원과 수진점간의 거리(m)

W : 지발당 장약량(kg)

n : 감쇠상수

b : 장약지수

거리와 지발당 장약량의 관계로부터 D/W^b 를 환산거리(Scaled Distance, SD)라고 하며, b 의 값이 1/2이면 자승근 환산거리(Square Root Scaled Distance), 1/3이면 삼승근 환산거리(Cube Root Scaled Distance)라고 한다. 일반적으로 근거리에서는 삼승근 환산거리가, 그리고 원거리에서는 자승근 환산거리가 잘 맞는 것으로 알려지고 있다.

자승근 환산거리 즉, 거리 D 를 장약량의 자승근으로 나눈 값 $D/W^{1/2}$ 의 함수로서 최대 입자속도를 나타내는 방식이며 삼승근 환산거리보다 더 전통적인 것이다. 자승근 환산거리는 장약이 긴 봉상으로 분포된 것에 기초한 것이다. 그러므로 공의 단위 길이당 밀도가 일정하다면 공의 직경은 장약량의 자승근에 비례한다. 따라서 $D/W^{1/2}$ 의 비는 대략 두 길이 즉, 발파지점과 수진기 중심과의 거리 D 와 $W^{1/2}$ 에 비례하는 발파공 반경의 비이다.

K , n 은 정량적으로 평가할 수 없는 인자에 의한 영향을 대표하는 값이다.

K (입지상수)는 발파부지와 인근구조물의 기하학적 형태, 대상암반의 지질학적 특징 및 역학적 특성을 나타내는 정수를 나타내고, n (감쇠지수)은 발파조건에 따르는 상수로 폭약의 종류, 장약량, 기폭방법, 전색상태, 자유면수, 발파유형, 폭원과 측점간의 거리를 나타내는 지수를 말한다.

시험발파의 목적은 K 값과 n 값을 통계적으로 구하기 위함이며 얻어진 결과를 통해서 발파설계를 할 수 있다.

지발당 장약량을 고정시키고 계측점을 달리하여 측정함으로써 거리에 따른 감쇠지수를 파악한다. K 값은 거리가 길어질수록, 폭원의 위력이 커질수록 증가하는 경향이 보이며 감쇠지수 n 은 대체적으로 -1.6을 중심으로 변하나 어떤 경향은 찾기 어렵다. 따라서 스웨덴의 Langefors는 n 값을 -1.6으로 고정하고 K 값만을 변수로 하고 있는데 이식은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$V = K(D/W^b)^{-1.6} \quad (2.2)$$

일반적으로 발파진동속도를 예측하기 위한 식으로 자승근 환산식은 다음과 같이 나타낸다.

$$V = K(D/W^{\frac{1}{2}})^n \quad (2.3)$$

여기서, V : 지반진동속도(cm/sec)

K : 입지상수

D : 폭원과 수진점간의 거리(m)

W : 지발당 장약량(kg)

n : 감쇠상수

삼승근 환산거리 즉, 거리 D 를 장약량의 삼승근으로 나눈 값 $D/W^{1/3}$ 의 함수로서 최대입자속도를 나타내는 방식이며, 어느 거리 이내에서는 자승근 환산식보다 더 보수적이다.

삼승근 환산식은 다음과 같이 나타낸다.

$$V = K(D/W^{\frac{1}{3}})^n \quad (2.4)$$

표 2.2 거리~지발당 장약량 조건표

단위 : kg

적용공법	진동속도 이격거리(m)	0.1cm/s	0.2cm/s	0.3cm/s	0.5cm/s	1.0cm/s	5.0cm/s	적용공법
TYPE I 미진동 굴착공법	5	0.00	0.00	0.01	0.01	0.03	0.25	TYPE II
	10	0.01	0.02	0.03	0.06	0.13	0.99	TYPE III
	15	0.02	0.04	0.07	0.13	0.30	2.24	TYPE IV
	20	0.03	0.07	0.12	0.22	0.53	3.98	
	25	0.05	0.11	0.18	0.35	0.83	6.21	TYPE V 일반발파
	30	0.07	0.16	0.27	0.50	1.20	8.95	
	40	0.12	0.28	0.47	0.89	2.13	15.9	TYPE VI 대규모발파
TYPE II 정밀진동 제어발파	50	0.19	0.44	0.74	1.40	3.32	24.9	
	60	0.27	0.64	1.06	2.01	4.79	35.8	
	70	0.37	0.87	1.45	2.74	6.51	48.7	
	80	0.48	1.14	1.89	3.58	8.51	63.6	
TYPE III 소규모 진동제어	90	0.61	1.44	2.39	4.53	10.8	80.5	
	100	0.75	1.78	2.95	5.59	13.3	99.4	
	110	0.90	2.15	3.57	6.76	16.1	120	
	120	1.08	2.56	4.25	8.05	19.1	143	
	130	1.26	3.01	4.99	9.45	22.5	168	
	140	1.47	3.49	5.79	11.0	26.1	195	
TYPE IV 중규모 진동제어	150	1.68	4.00	6.64	12.6	29.9	224	
	160	1.91	4.55	7.56	14.3	34.0	254	
	170	2.16	5.14	8.53	16.2	38.4	287	
	180	2.42	5.76	9.56	18.1	43.1	322	
	190	2.70	6.42	10.7	20.2	48.0	359	
	200	2.99	7.11	11.8	22.4	53.2	398	
	210	3.30	7.84	13.0	24.7	58.6	438	
	220	3.62	8.61	14.3	27.1	64.4	481	
	230	3.96	9.41	15.6	29.6	70.3	526	
	240	4.31	10.2	17.0	32.2	76.6	573	
TYPE V 일반발파	250	4.67	11.1	18.4	34.9	83.1	621	
	260	5.05	12.0	20.0	37.8	89.9	672	
	270	5.45	13.0	21.5	40.8	96.9	725	
	280	5.86	13.9	23.1	43.8	104	779	
	290	6.29	15.0	24.8	47.0	112	836	
	300	6.73	16.0	26.6	50.3	120	895	
TYPE VI	450	15.1	36.0	59.8	113	269	2013	

0.06

미진동 굴착공법

0.25

정밀진동제어발파

1.00

소규모 진동제어발파

3.00

중규모진동제어발파

7.50

일반발파

20.0

대규모발파

- 주) 1. 위 발파공법별 적용거리 기준 및 지발당 장약량은 설계 발파진동 추정식 $v = 200(D/\sqrt{W})^{-1.6}$ 에 의하여 설정한 것으로, 발파 대상 현장의 암반특성 및 관리 대상 보안물건의 특성에 따라 증감될 수 있다.
2. 발파소음의 제어는 지반진동보다 훨씬 어려우므로 만약, 발파소음에 민감한 가축 사육시설 또는 요양원, 종교시설 등이 근접한 경우에는 별도 공법을 적용할 수 있다.
3. TYPE별 공법 설계는 상기기준에 맞게 하되 현장여건에 따라 조정할 수 있다.
4. 발파진동은 보안물건의 노후도나 상태, 암반상태, 진동주파수 등에 따라 달라지므로, 설계자 및 발파자는 보안물건상태, 현장조건과 관련법규 등을 검토하여 발파진동 허용기준치를 설정하고 이에 대한 이격거리별 지발당 장약량을 산정하여야 한다.

표 2.3 표준발파공법별 분류기준

구 분	TYPE I 미진동 굴착공법	TYPE II 정밀진동 제어발파	TYPE III·IV 진동제어발파		TYPE V 일반발파	TYPE VI 대규모 발파
			소규모	중규모		
공법개요	보안물건 주변에서 TYPE II 공법 이내 수준으로 진동을 저감시킬 수 있는 공법으로서 대형 브레이커로 2차 파쇄를 실시하는 공법	소량의 폭약으로 암반에 균열을 발생시킨 후, 대형 브레이커에 의한 2차 파쇄를 실시하는 공법	발파영향권 내에 보안물건이 존재하는 경우 “시험발파” 결과에 의해 발파설계를 실시하여 규제기준을 준수할 수 있는 공법		1공당 최대 장약량이 발파규제기준을 충족시킬 수 있을 만큼 보안물건과 이격된 영역에 대해 적용하는 공법	발파영향권 내에 보안물건이 전혀 존재하지 않는 산간 오지 등에서 발파효율만을 고려하는 공법
주 사용폭약 또는 화공품	최소단위미만폭약 미진동파쇄기 미진동파쇄약 등	에멀전 계열 폭약	에멀전 계열 폭약		에멀전 계열 폭약	주폭약: 초유폭약 기폭약: 에멀전
지발당장약량범위(kg)	폭약기준 0.125 미만	0.125 이상 0.5 미만	0.5 이상 1.6 미만	1.6 이상 5.0 미만	5.0 이상 15.0 미만	15.0 이상
천공직경	φ 51mm 이내	φ 51mm 이내	φ 51mm 이내	φ 76mm	φ 76mm	φ 76mm 이상
천공장비	공기압축기식 크롤러 드릴 또는 유압식 크롤러 드릴 선택 사용					
표준패턴	미진동 굴착공법	정밀진동 제어발파	진동제어발파		일반발파	대규모 발파
			소규모	중규모		
천공깊이 (m)※	1.5	2.0	2.7	3.4	5.7	8.7
최소저항선 (m)※	0.7	0.7	1.0	1.6	2.0	2.8
천공간격 (m)※	0.7	0.8	1.2	1.9	2.5	3.2
표준 지발당 장약량(kg)	-	0.25	1.0	3.0	7.5	20.0
파쇄 정도	균열만 발생 (보통암 이하)	파쇄 + 균열	파쇄 + 균열		파쇄 + 대괴	파쇄 + 대괴
계측관리	필 수	필 수	필 수		선택	선택
발파보호공	필 수	필 수	필 수		불필요	불필요
2차 파쇄	대형브레이커 적용	대형브레이커 적용	-		-	-

※ 천공 깊이, 최소저항선, 천공간격 치수 등은 평균적으로 제시한 수치이며, 공사시행 전에는 시험발파에 따라 현장별로 검토·적용할 것.

표 2.4 표준발파공법 패턴별 특성

Type	명칭	설계 지발당 장약량 (kg)	발파제원※ W×E×H(m)	천공경 (mm)	공당 파쇄량‡ (m3/공)	사용폭약
I	미진동 굴착공법	폭약기준 0.125 미만	0.7×0.7×1.3	φ 51 이내	0.637	
II	정밀 진동제어발파	0.25	0.7×0.8×1.8	φ 51 이내	1.01	에멀전 폭약 등 (ø 25~32mm)
III	소규모 진동제어발파	1.0	1.0×1.2×2.4	φ 51 이내	2.88	" (ø 32mm)
IV	중규모 진동제어발파	3.0	1.6×1.9×3.0	φ 76	9.12	" (ø 50mm)
V	일반발파	7.5	2.0×2.5×4.8	φ 76	24.0	" (ø 50mm)
VI	대규모발파	20.0	2.8×3.2×7.3	φ 76 이상	65.4	주폭약:초유폭약 기폭약:에멀전

주)※ W : 최소저항선 E : 공간간격 H : 벤치고 ‡ 공당파쇄량은 평균값임.

1. 설계 지발당 장약량 기준은 설계 발파진동 추정식 $v = K(D/W^b)^n$ 에 의한 “거리~지발당 장약량” 조건표 기준임(진동상수 $K = 200$, $n = -1.6$, $b = 1/2$).
2. 발파대상 암반의 강도나 지형특성 등에 따라 설계 지발당 장약량과 발파제원이 변동될 수 있음
3. 미진동파쇄기와 유압잭 및 브레이커 파쇄공법 등은 진동전파 특성에 따라 일반폭약과는 상이하므로 시험시공에 의해 지발당장약량과 천공패턴 등의 굴착방법을 설정할 것
4. 장소가 협소하거나 현장 여건상 크롤러 드릴의 사용이 곤란한 장소에서는 착암기를 사용한 발파공법을 적용할 수 있음.

표 2.5 표준발파공법 및 진동규제기준별 적용 이격거리(m)

단위 : cm/s

TYPE	발파공법	v=0.1	0.2	0.3	0.5	1.0	5.0
I	미진동 굴착공법	40m까지	25m까지	20m까지	15m까지	5m까지	3m까지
II	정밀 진동제어발파	40~80	25~50	20~40	15~30	5~20	3~7
III	소규모 진동제어발파	80~140	50~90	40~70	30~50	20~30	7~10
IV	중규모 진동제어발파	140~260	90~170	70~130	50~90	30~60	10~25
V	일반발파	260~450	170~290	130~220	90~160	60~110	25~40
VI	대규모발파	450m이상	290m이상	220m이상	160m이상	110m이상	40m이상

(1) 발파진동 상수식

$$K = E_i (R_i \times S_c + Q_i) \quad (2.5)$$

여기서, S_c : 압축강도(kg/cm²)

R_i : 압중에 따른 발파상수(서울화강암 0.0371, 서울편마암 0.0206)

E_i : 화약보정률(dynamite : 0.1, 함수폭약 : 0.8, ANFO : 0.65)

Q_i : 발파방법에 따른 보정값

표 2.6 발파방법에 따른 보정값(Q_i)

Q_i	서울 화강암	서울 편마암
개착식	바 닥 80	60
	계 단 50	30
터널식	심빼기 60	40
	확 대 30	10

(2) 일반식

일반식은 지발당 장약량 W 와 거리 D 를 각각 독립변수로 하여 최대 입자속도를 나타내는 방식이며 본식은 일반적으로 어느 거리에서의 지발당 허용장약량이 자승근 환산식이나 삼승근 환산식보다 보수적이다.

발파 진동식을 예측하기 위한 일반식은 다음과 같다.

$$V = K \cdot D^a \cdot W^b \quad (2.6)$$

여기서, a : 거리지수

b : 장약지수

식 (2.6)의 지수 a , b 의 값에 대한 연구가 많이 행해 졌으며 그 결과에 의하면 $a=-1\sim-2$, $b=0.3\sim0.6$ 의 값이며 특히 a 에 대해서는 -1.5 , b 에 대해서는 0.5 가 일반적으로 적합한 것으로 일컬어지고 있다.

폭원과의 거리와 허용진동속도 한계치에 따라 자승근과 삼승근 환산식 및 일반식에 의한 지발당 최대 허용장약량이 서로 다르므로 상기 식들은 상호 비교 검토하여 사용하는 것이 안전하다. 지반진동속도 외에 진동가속도를 고려해야 하는 경우에도 속도를 가속도로 변환하여 상기 식들을 도출한 후 상호 비교 검토해야 할 필요성이 있다.

2.2.3 발파 소음 및 폭풍압의 예측

발파과정에서 발생하는 발파소음을 예측하기 위해서는 우선 발파소음에 영향을 미치는 변수들에 대한 평가가 이루어져야 한다. 동시에 발파되는 화약량, 발파공내 화약이 위치하는 장약의 위치, 최소저항선, 전색 상태, 지발 발파시의 지연시차, 풍향 및 풍속, 온도 등의 기상조건, 발파위치와 측정위치 사이의 지형, 사용되는 화약의 종류 등 수 많은 변수들에 의해 발파소음의 크기는 영향을 받게 된다.

현재까지 발파분야에서 발파소음에 대한 대부분의 연구는 이러한 여러 변수들 중에서 연구대상으로 선택한 하나의 변수와 발파소음의 크기 및 전파와의 관계를 분석하는 것이 주를 이루어 왔다. 그러나 실제로 발파작업이 이루어지는 현장에서 앞서 소개된 여러 변수들을 모두 고려하여 발파소음을 예측하는데는 많은 시간과 비용이 들뿐만 아니라 여러 변수들이 각 현장마다 고정되어 있는 것이 아니므로 그 정확성을 확신하기도 힘들다.

음압수준은

$$dB = 20 \log \frac{P}{P_o} \quad (2.7)$$

의 관계를 가진다.

이 때 P_o 는 최저가청음압으로서 $2 \times 10^{-5} Pa$, $2 \times 10^{-4} \text{dynes/cm}^2$, 2.04×10^{-10} , kgf/cm^2 , $2.9 \times 10^{-9} \text{psi}$ 의 값을 가지며 P 는 측정된 최대 음압이다.

압력단위가 언급될 때는 측정된 압력이 기압보다 높다는 것을 나타내는 과압이라고 부르는데 이 과압을 지발당 장약량 W 와 폭원과의 거리 D 를 변수로 한 삼승근 환산거리 $D/W^{1/3}$ 와 관계 지으면 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$P(Pa) = 3300 \left(\frac{D}{W} \right)^{-1.2} \quad (2.8)$$

또한 삼승근 환산거리와 음압수준(dB)과의 관계는 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$dB = 164.4 - 24 \log \left(\frac{D}{W} \right)^{\frac{1}{3}} \quad (2.9)$$

2.2.4 지발당 장약량의 변화

시험발파 전에 발파현장을 답사하여 발파지역 주변의 주요 구조물이나 시설물들의 현황을 파악하고 이들의 상태를 조사해야 하며, 지하와 지상의 구조물이나 시설물들의 상황에 적합한 허용지반진동속도를 결정해야 한다. 또한 최근엔 가축들에 대한 영향도 고려하는 추

세이다. 이러한 발파현장 주변상황을 파악한 후 시험발파 위치를 선정한다. 위치 선정시 지발당 장약량은 물론 계측기 운용 계획도 고려하는 것이 좋다. 계단발파가 주를 이루는 현장의 경우 2자유면을 형성해야 하는데 2자유면이 형성되어 있지 않은 현장에서는 부득이 1자유면 발파를 실시해야 한다.

발파현장 상황에 따라서는 폭속이 빠르거나 위력이 큰 폭약만을 사용해서는 암반전체를 제거할 수 없는 경우도 있을 것이다. 이러한 상황에서는 저폭속과 낮은 위력을 가지는 화약류를 병용해서 사용한 시험발파를 실시하는 것이 합리적일 것이다. 이 때 계측된 자료는 폭약의 종류별로 처리해야 한다.

폭원과 각종 보안물건들과의 거리에 따라 한정된 진동속도에서는 지발당 최대 허용장약량을 예측한 후, 그 이하로 3단계 이상 지발당 장약량을 변화시켜 시험발파를 실시하는 것이 좋을 것으로 판단되며, 발파횟수는 운용하고자 하는 계측기 수의 영향을 받는다.

2.2.5 계측자료

시험발파를 수행시 현장에서 사용할 계측기의 수를 고려하여 발파 횟수와 지발당 장약량의 변화 및 계측거리를 결정한다. 지발당 장약량과 계측거리를 변수로 하는 환산 거리가 밀집되지 않고 폭넓게 분포되도록 해야 한다.

또한 발파현장 상황을 검토하여 각종 구조물이나 시설물에 피해가 없는 한계지반진동속도를 예측하여 이 지반진동속도에 해당하는 환산거리가 시험발파 전체 자료의 분포에서 중앙에 위치해야 바람직하다.

자료를 분석하는데 있어서 분석결과에 좋지 못한 영향을 미칠 수 있는 자료는 제외시키고 양호한 자료를 최소 30개 이상이 되어야만 자료 분석의 의미와 신뢰성 있는 결과를 기대할 수 있을 것이다.

시공 중 계측관리는 실제 문제가 있을 것으로 판단되는 보안물건에 위치시키거나 그 주위에 계측기를 설치하여 발파시마다 계측해야 하며, 기준치 이상일 경우 상황을 판단하여 적절한 조치를 취해야 한다.

2.2.6 진동계측기의 선택

발파진동의 측정은 주파수 특성이 적합한 기기를 선정해야 하며 이른바 공해 진동계나 저주파수의 오실로그래프는 발파진동과 같은 높은 주파수를 지닌 현상에 따를 수 없는 경우도 있어서 기록된 파형이 반드시 실태에 맞지 않을 수도 있으므로 통상적으로는 부적당하다고 볼 수 있다.

전자식 수진기의 고유주파수가 진동주파수보다 작아야만 수진기가 진동정도에 비례해서 전압을 출력하므로 측정하려는 진동의 주요 주파수의 $1/1.5$ 이하인 고유주파수를 지닌 수진기를 이용할 필요가 있다.

고유주파수가 낮을수록 수진기는 크고 무겁게 된다. 그러나 자연지진의 경우와는 달리 발파진동에서는 기록되는 파동의 주파수는 통상 수10Hz~수 100Hz이므로 수진기의 고유주파수는 수 10Hz 정도의 것이면 되는 경우가 많고, 이 경우에는 수진기가 비교적 소형 경량의 것이 되어 야외에서의 측정도 간편하게 된다. 따라서 측정하려는 진동이 대개 어느 정도의 진동수인가에 따라 거기에 적합한 고유 진동수를 지닌 수진기를 선택해야 한다.

일반적으로 진동속도 수진기를 이용하여 계측하면 진동속도는 물론 각 방향의 가속도 역시 기록되어 판독할 수 있으나 각 방향의 가속도 합이 나타나지 않으므로 이를 위해서는 진동가속도 전용 수진기가 있으므로 이를 이용하는 것이 바람직하다.

진동 계측에는 수진기, 증폭기, 기록기가 필요하며 최근에는 증폭기, 기록기 중간에 자기 기록기를 사용하는 것이 일반화되어 있다. 이 조합에 있어서 종합주파수 특성에 유의하여 측정하려 하는 파동의 주파수가 특성 곡선의 평탄한 부분으로 수용되도록 기기의 선택을 해야 한다.

2.2.7 계측기의 계측방법 및 설치

진동 측정기는 중요한 것이 발파진동을 감지하는 변환기이다. 변환기에는 지오폰(Geophone) 및 피조메타(Piezometer)형태가 있는데 발파진동의 주파수 영역인 5~200Hz에 대한 반응을 보여야 된다.

일반적으로 지면에 수직인 방향의 진동성분(V), 지면에 수평인 성분 중 발파원 방향의 진동성분(L)과 이와 직교하는 성분(T) 등 세 성분으로 계측한다.

이 목적을 위해 처음부터 3방향의 것을 하나로 조합한 수진기를 일반적으로 사용하고 있다. 주파수 특성은 구조물 영향에 대한 중요한 척도이므로 진동의 세방향 성분에 대한 시간적 변화가 계측되어야 한다.

한편, 발파점에서 어느 정도 멀어지면 대개는 상하 방향의 성분이 탁월하게 되기 때문에 상하 방향의 성분만을 기록해도 대체로 목적이 달성되는 경우가 많으며 오히려 이렇게 해서 측정점을 많이 잡는 쪽이 파동의 감쇠상황을 검토하는 데에도 적합하다고 생각되지만 지반상의 측정으로는 수평 방향의 진동쪽이 오히려 크게 되는 경우가 많고, 환경공해 대책에 있어서는 수직진동의 영향을 문제로 삼아야 할 때도 많아서 수직, 수평 방향 성분의 두 기록이 모두 필요하다.

(1) 계측

일반적으로 3방향의 수진기가 서로 직각으로 조합되어 있으므로 각 방향 이력곡선과 함께 최대치가 기록되고 3방향의 벡터합도 기록된다.

기록 시간은 한 발파에 소요되는 시간 즉, 뇌관의 시차를 계산하여 결정하여야 한다. 계측기는 지반진동과 소음 및 폭풍압을 측정할 수 있는 장치가 조합되어 있으며, 목적에 따라 이중 일부를 제외시킬 수도 있다.

(2) 설치

구조물 영향평가를 위한 계측지점의 선택은 국가별로 약간씩 다르다. 미국, 캐나다의 경우 대상 구조물에 인접한 지반에 설치하여 계측하고, 유럽은 구조물 기초에 설치 계측한다.

측정장치는 지질상태가 일정한 선상을 최대한으로 선택하여 배치해야 하며 진동가속도를 고려하여 흔들리지 않게 고정시켜야 한다.

측정하려는 지점의 진동을 정확하게 기록하기 위해서는 수진기를 대상 암반 또는 지반에 밀착해서 고정시켜 놓아야 한다. 그렇지 않으면 최초의 발파충격으로 수진기가 거동하여 지반의 진동과는 무관한 기록 예를 들어 비틀거림이나 전도에 의한 큰 진동을 기록하던가 하면 잘못된 결론이 날 때도 있으므로 설치 장소의 암반을 부석이나 전석등과 혼동하지 않도록 주의할 필요가 있다.

암반인 경우에는 다음과 같은 방법이 취해진다. 암반에 깊이 30cm 정도의 구멍을 천공하고 여기에 철봉을 삽입해서 시멘트 모르타르로 메워 양생시킨 다음 여기에 앵커를 설치하고 여기서 수진기 베이스를 나사로 고정한다. 이 수진기 베이스에는 수평 4방향 및 상하방향에 각각 나사가 설치되어 있으며 필요한 방향으로 수진기의 다리를 나사로 고정한다. 이렇게 해서 수진기와 암반은 일체화된다. 암반상태가 양호한 경우에는 암반에 직접 앵커를 설치하여 수진기 베이스를 고정시키는 방법도 있다.

소음의 측정은 피해가 우려되는 장소로서 소음도가 높을 것으로 예상되는 지점에서 지면 1.2~1.5m 높이로 한다.

측정하는 지점에 건물 등 높이가 1.5m를 초과하는 장애물이 있는 경우에는 장애물로부터 소음원 방향으로 1~3.5m 떨어진 지점으로 한다. 다만, 그 장애물이 방음벽 이거나 충분한 차음이 예상되는 경우에는 장애물 밖의 1~3.5m 떨어진 지점 중 암영대의 영향이 적은 지점으로 한다.

소음계로 측정시에는 측정자의 몸으로부터 소음계가 50cm 이상 떨어져야 한다.

풍속이 2m/sec 이상일 때에는 반드시 마이크로폰에 방풍망을 부착하여야 하며, 풍속이 5m/sec를 초과할 때에는 측정하여서는 안 되며, 진동이 많은 장소 또는 전자장(대형 전기 기계, 고압전선 근처 등)의 영향을 받는 곳에서는 적절한 방진, 차폐 등을 강구하여 측정하

여야 한다.

대상소음이 없을 때 압소음도를 측정하여 보정하여야 한다. 측정소음도가 압소음보다 10dB(A) 이상 크면 압소음의 영향이 극히 작기 때문에 압소음의 보정없이 측정소음도를 대상소음도로 하며, 측정소음도가 압소음보다 3~9dB(A) 차이로 크면 압소음의 영향이 있기 때문에 측정소음도에 보정표에 의한 보정치를 보정한 후 대상소음도를 구한다.

표 2.7 압소음의 영향에 대한 보정표

측정소음도와 압소음도의 차	3	4	5	6	7	8	9
보 정 치	-3	-2		-1			

(3) 보정

- ① dB(L) : 음압의 크기를 Level을 표시한 것으로 폭발로 인하여 공기압으로 표출되는 폭풍압으로 인한 공기의 압력으로 그 크기가 결정된다.
- ② dB(A) : 음압의 크기도 주파수 크기가 달라지면 인체에 느끼는 감각적 크기가 달라지기 때문에 중심주파수 1,000Hz 기준으로 하여 등청감도 곡선에 의거 보정된 소음치를 의미하며, 환경의 소음기준도 dB(A)를 의미한다.

표 2.8 dB(L)을 dB(A)로 보정할 때 주파수 영역별 개략적 보정치

주파수(Hz)	20	30	40	50	60	70	80	90	100
소음보정치dB(A)	-50.0	-40.0	-31.5	-29.5	-26.0	-23.5	-22.0	-20.5	-19.0

dB(A)는 소음레벨로 가청영역을 나타내는 단위이고, dB(L)은 음압레벨로 가청영역을 포함하여 저주파와 고주파를 모두 포함하는 단위이다. 음압레벨 dB(A)와 소음레벨 dB(L)의 관계는 다음과 같다.

$$dB(A) = dB(L) - 32(95\% \text{ 신뢰수준}) \quad (2.10)$$

$$dB(A) = dB(L) - 45(\text{평균예측식}) \quad (2.11)$$

2.3 분석

2.3.1 진동 데이터의 분석

신호를 분석하는 방법은 여러 가지가 있는데 그 중 주파수를 분석하는 것이 진동의 원인을 규명하는데 가장 유용하다.

먼저 주파수 분석과 FFT 분석에 대하여 살펴보자.

(1) 주파수 분석

일반적인 설비의 진동파형은 그림 2.2와 같이 각기 다른 진폭, 위상 주파수로 되어 있다.

주파수 분석이란 복잡한 파형으로 나타나는 진동의 각 성분을 구별하고 그 성분의 주파수와 진폭을 알아내므로 진동의 발생 포인트와 크기를 찾아내는 것이다.

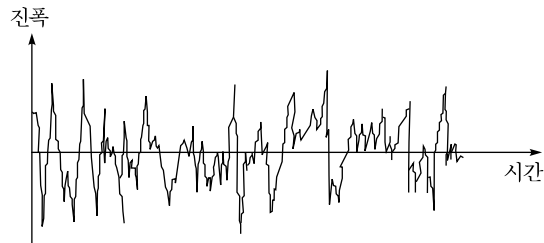


그림 2.2

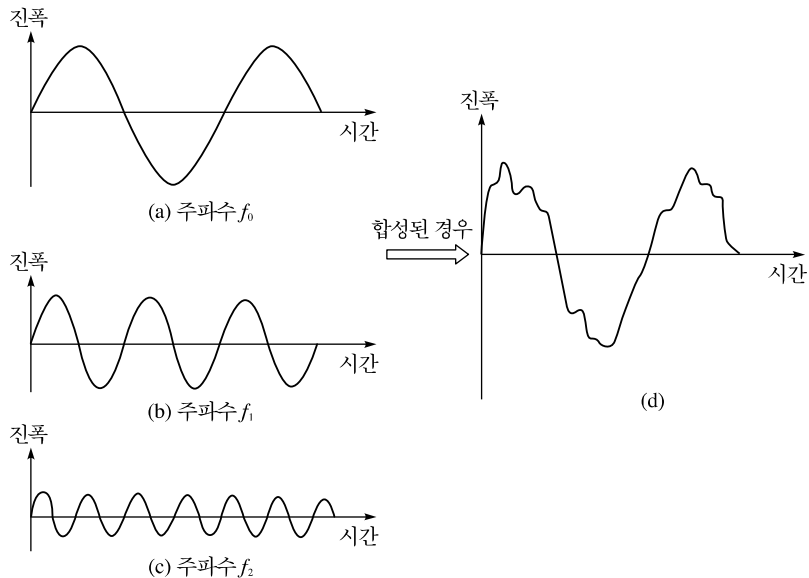


그림 2.3

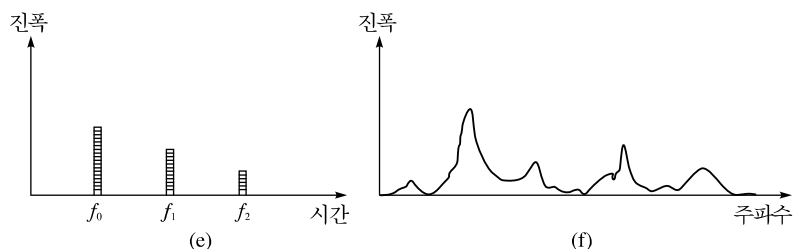


그림 2.3(계속)

그림 2.3에서 어떤 진동 (d)는 (a), (b), (c)의 세 가지 성분으로 구성되어 있다고 가정하자. (주파수 분석은 위상간의 차이와는 별개임) 진동파형 (d)의 주파수를 분석하면 (a), (b), (c)와 같이 3가지 성분의 주파수 및 진폭으로 분리하여 표시할 수 있다.

마찬가지로 그림 2.2의 진동 파형을 주파수 분석하면 그림 2.3의 (f)와 같이 된다.

이 분석 결과와 판정 차트를 사용하여 비정상적인 포인트가 어디인지를 찾아낼 수 있는 것이다.

(2) FFT 분석

FFT란 Fast Fourier Transform의 첫 글자(Initial)에서 나온 것으로 디지털 계산을 통하여 빠른 속도로 주파수를 분석하는 연산법이다. 주주파수의 대역을 결정하기 위해 발파진동의 파형을 측정 기록하여 이로부터 최대 진동속도가 나타나는 부분의 주파수를 직접 계산하는 방법(Zero Cross Analysis)과 진동속도와 주파수의 변화를 상대진동속도 대 주파수 그래프로 도시하는 주파수 스펙트럼(Fourier Frequency Spectrum)을 작성하여 가장 큰 진동속도 대의 주파수 범위를 분석하는 방법 등 2가지가 있다.

각 방법에는 장단점이 있지만 주파수 분해능과 분석 결과를 처리하는 면에 있어서 주파수를 직접 계산하는 방법보다는 주파수 스펙트럼을 사용하는 방법이 좋다고 할 수 있다.

2.3.2 신뢰도 50% 추정식

발파설계를 위해서는 대상 지역에서의 시험발파를 통한 K , n 상수 값을 정의하는 것이 매우 중요하며 K , n 값이 결정되고, 허용진동속도가 주어지면 발파진동식에서 폭원으로부터의 거리와 지발당 장약량과의 관계를 나타내는 노모그램을 작성할 수 있다.

$$V = K(SD)^n \quad (2.12)$$

여기서, V : 입자속도(cm/sec, mm/sec)

K : 입지상수

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

R : 폭원과 수신점간의 거리(m)

W : 지발당 최대 장약량(kg)

n : 감쇠지수

이와 같은 식으로 도출하기 위하여 계측자료의 진동속도 V 와 환산거리 SD 를 \log 값으로 취하면 $\log V = \log K + n \cdot \log(SD)$ 의 형태를 취한다.

그 결과 $y = a + nx$ 형태의 직선식이 되어 a 와 n 값이 산출되는데 일반적으로 $a > 0$, $n < 0$ 이 된다. 여기서 SD 가 1일 때 V 는 K 이다.

한편 입지상수의 결정법은 Log-Log Scale로 좌표상에 도시하였을 때 기울기(n)와 절편($\log K$)으로부터 결정한다.

자료를 분석하여 추정식을 도출함에 있어서 일반적으로 분석자료에 대한 결정계수와 상관계수의 언급이 필요하다. 결정계수란 회귀분석에서 회귀직선의 유의성 검정과 더불어, 회귀분석에 의한 종속변수가 설명되어지는 정도를 나타내는 것이다. 결정계수 값이 0에 가까울수록 추정된 회귀직선은 신뢰성이 낮고 1에 가까울수록 신뢰성이 높은 회귀직선이 된다.

결정계수는 자료로부터 추정한 회귀식이 적합도를 결정하는데 사용된다. 즉, 자료의 각 분산점들이 추정한 회귀선에 얼마나 가깝게 접근해 있는가를 나타내주는 계수를 말한다.

또한 상관계수는 상호자료들의 상관의 강도를 양적으로 표시한 지표를 말하는데 결정계수의 평방근으로 해서 얻어진다. 표본 상관계수는 $-1 \leq R \leq 1$ 의 범위값을 갖는데 $R > 0$ 일 때 정상관, $R < 0$ 일 때 역상관, $R = 0$ 일 때는 무상관이라 한다.

진동속도와 환산거리와의관계는 역상관의 관계를 가지며, 결정계수가 최소한 $R^2 \geq 0.7$ 정도 되어야 비교적 균일한 지반에서 정상적인 발파가 이루어진 것으로 판단할 수 있다.

2.3.3 95% 신뢰구간선

주어진 환산거리에서 평균치에 대한 입자속도의 편차가 있다. 95% 신뢰치는 이 환산거리에서 100회 발파 중 95회까지는 입자속도가 그 한계를 초과하지 않게 되리라는 값이다. 이 선은 95% 신뢰치들을 연결한 것이다. 이와 같은 통계상의 특징은 발파작업이 일정하게 이루어질 때만 타당성이 있다. 따라서 언제든지 저항선, 지발당 장약량, 지질들이 급격히 변화할 때 통계자료가 달라진다는 것을 항상 명심해야 한다.

95% 신뢰구간선은 시험발파로부터 얻은 자료로 직접 통계 계산하여 구할 수 있고 환산거리 자료의 작도로 산정할 수 있다. 그림 2.3의 95% 선은 통계적으로 작성하였지만 25점 중의 한 개 즉, 데이터의 4%만 그 선 위로 나온다. 할선으로 표시한 95%선은 중앙 실선과 같

은 기울기를 가지므로 중앙 실선과 같은 기울기를 갖고 자료가 5%만 나오도록 95% 신뢰구간선을 대략 작도할 수 있다. 물론 이 방법은 자료가 20개 이하일 때는 적용할 수 없고 측정의 일부만 배제하기 어렵다.

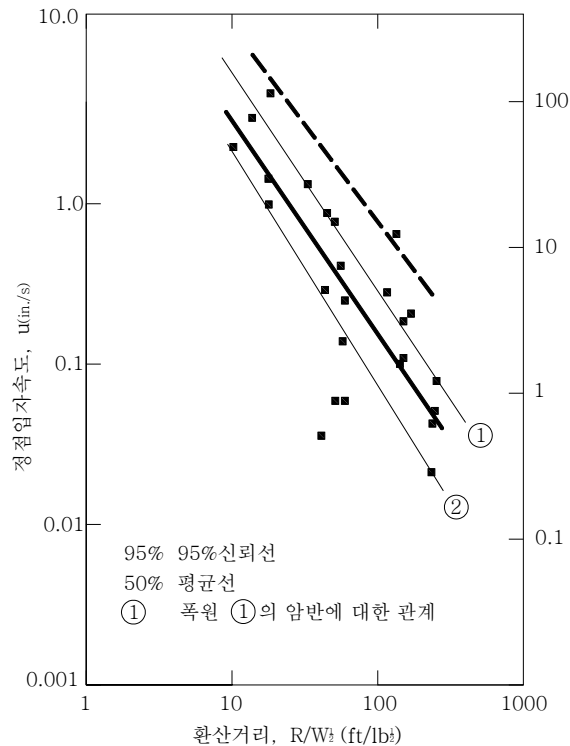


그림 2.4 시험발파에서 공에 따른 감쇠관계의 변화

다른 방법으로서 통계적 관계로부터 중앙치와 95% 신뢰구간 사이의 거리를 결정할 수 있다. 감쇠계수의 양대수(log-log) 도면상에서 동일한 환산거리에 대한 95% 선상의 입자속도와 중앙값의 비는 10의 표준편차 역승의 1.65배이다. 예를 들어 평균속도와 95% 신뢰구간속도가 각각 0.82와 2.66이고, 표준편차가 0.295이면 $2.66 = 0.82 \times 1.65 \times 10^{0.295}$ 이다.

2.3.4 신뢰구간 추정식

모든 가능한 표본 내의 어떤 값을 의미하는 표본 결과값을 일반적으로 통계량이라 하고, 통계량의 표준 편차를 표준오차라 정의한다.

표본오차는 표본 결과값의 정도를 추정하고 상이한 표본 추출방법간의 효율성과 정도수준을 비교하기 위하여 필요하지만 일반적으로 이 값을 모르기 때문에 표본 결과값을 가지고

추정하고 있다. 따라서 표본의 수 n 이 크지 않으면($n < 30$) 정규분포라고 할 수 없으므로 표본의 수 n 이 클 필요가 있다.

t -분포와 표준 정규분포의 형태는 종 모양으로 비슷한 형태이긴 하지만, t -분포에서 유의 수준 α 를 결정하고 표본의 크기에 따른 t 값을 찾아야 한다. t 값을 찾는데 있어서 표본의 크기가 $n < 30$ 이면 t -분포 표에서 $(n-1)$ 의 자유도를 고려하여야 할 필요가 있다. 또한 유의 수준 α 를 결정하는데 있어서 자료들의 분산과 지질구조의 변화 등을 고려해야 할 필요가 있다.

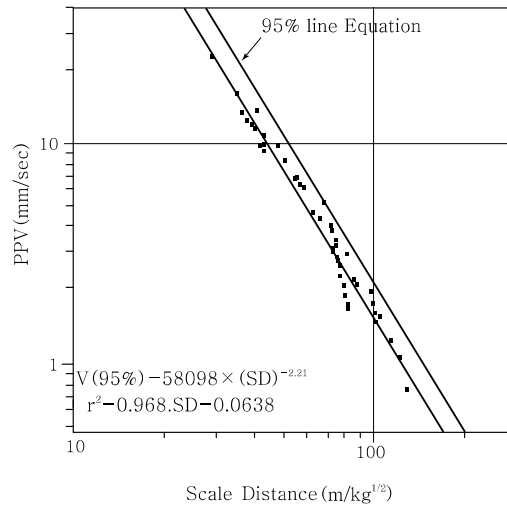


그림 2.5 자승근 환산거리와 최대진동속도와의 관계

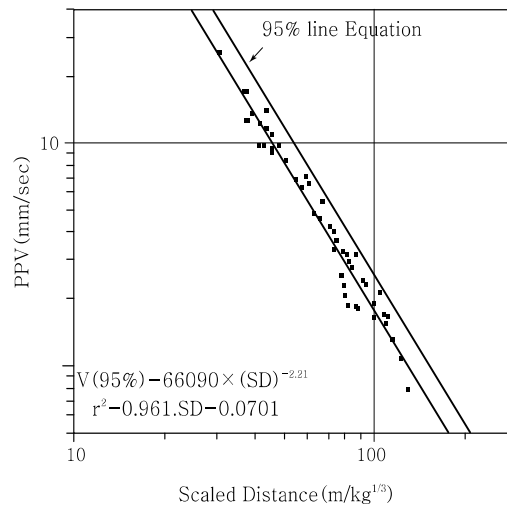


그림 2.6 삼승근 환산거리와 최대진동속도와의 관계

그림 2.5, 그림 2.6은 시험발파의 예를 들어서 분석한 경우이다.

시험발파설계에 오류가 있으면 일반식의 도출시 독립변수의 거리 D 의 지수가 양의 부호가 되거나, 장약량의 W 의 지수가 음의 부호가 되는 경우도 있다. 이러한 오류가 있는 자료를 자승근과 삼승근 환산식으로 도출하는데 있어서 표면상으로는 문제가 없는 것 같이 보이나, 이러한 자료는 신뢰성이 없으므로 그 결과에 대해서도 의심의 여지가 있다.

안전문제를 고려하여 대상지역에서의 설계에 이용할 발파진동 예상식은 모든 측정자료를 포함할 수 있는 95%의 신뢰도를 갖는 식을 선택한다.

식 (2.12)에 의해 회귀분석 결과는 다음과 같다.

$$V = 58098 \left(\frac{D}{\sqrt{W}} \right)^{-2.21} \quad r^2 = 0.968$$

$$V = 66090 \left(\frac{D}{\sqrt[3]{W}} \right)^{-2.21} \quad r^2 = 0.961$$

위 식은 95%의 신뢰도를 갖은 공식으로 K 값은 각각 58098, 66090으로 나타났으며, n 값은 -2.21 , -2.21 로, 그리고 이 Data들의 결정계수(r^2)는 0.968, 0.961으로 나타났다.

2.3.5 지발당 최대 허용장약량 산출

그림 2.4와 그림 2.5의 환산도표에서는 자승근 환산식과 삼승근 환산식, 일반식의 최대 허용장약량이 동일한 3개의 점(교차점)이 나타나게 된다. 이것은 각각 자승근과 삼승근 환산식에 의한 지발당 최대 허용장약량이 동일한 점(VD_1), 삼승근 환산식과 일반식에 의한 지발당 최대 허용장약량이 동일한 점(VD_2), 자승근 환산식과 일반식에 의한 지발당 최대 허용장약량이 동일한 점(VD_3)이다. 표 2.6은 자유도가 n 일 때 t -분포 곡선에서 한쪽 꼬리의 면적이 α 가 되는 t 의 값을 나타내고 있다.

발파에 대해 관심을 가지고 있거나 발파업에 종사하는 기술자들의 일부는 이러한 교차점들에 대한 의미를 깊게 인식하지 못하고 일반적으로 폭원에서부터 근거리에 위치하는 보안물 건에는 삼승근 환산식에 의한 지발당 최대 허용장약량을 사용하고, 원거리의 경우에는 자승근 환산식에 의한 장약량을 사용해야 안전하다는 개념 정도만으로 이해하고 있는 것 같다.

하지만 원거리와 근거리라는 기준이 정해져 있지 않고 발파현장마다 다를뿐더러 암반의 구조나 암질에 따라서도 다르다. 또한 동일한 발파현장이라 하더라도 허용지반진동속도의 한계치에 따라 다르다.

표 2.9는 위 분석을 이용하여 최대허용진동기준치를 $0.3kine$ 으로 고정한 후 거리별 지발당 장약량을 산출한 것이다.

표 2.9 거리별 지발당 장약량

거리 허용진동크기	3mm/sec(0.3kine)	
	자승근(kg)	삼승근(kg)
50	0.327	0.163
55	0.396	0.217
60	0.471	0.282
65	0.552	0.358
70	0.641	0.447
75	0.735	0.550
80	0.837	0.667
85	0.945	0.800
90	1.06	0.950
95	1.18	1.12
100	1.31	1.30
105	1.44	1.51
110	1.58	1.73
115	1.73	1.98
120	1.88	2.25
125	2.04	2.55
130	2.21	2.86
135	2.38	3.21
140	2.56	3.58
145	2.75	3.97
150	2.94	4.40

표 2.10 t -분포

α 자유도 n	0.40	0.25	0.10	0.05	0.025	0.01	0.005
1	0.325	1.000	3.078	6.314	12.706	31.821	63.657
2	0.289	0.816	1.886	2.920	4.303	6.965	9.3925
3	0.277	0.765	1.638	2.353	3.182	4.541	5.841
4	0.271	0.741	1.533	2.132	2.776	3.747	4.604
5	0.267	0.727	1.476	2.015	2.571	3.365	4.032
6	0.265	0.718	1.440	1.943	2.447	3.143	3.707
7	0.263	0.711	1.415	1.895	2.365	2.998	3.499
8	0.262	0.706	1.397	1.860	2.306	2.896	3.355
9	0.261	0.703	1.383	1.833	2.262	2.821	3.250
10	0.260	0.700	1.372	1.812	2.228	2.764	3.169
11	0.260	0.697	1.363	1.796	2.201	2.718	3.106
12	0.259	0.695	1.356	1.782	2.179	2.681	3.055
13	0.259	0.694	1.350	1.771	2.160	2.650	3.012
14	0.258	0.692	1.345	1.761	2.145	2.624	2.977
15	0.258	0.691	1.341	1.753	2.131	2.602	2.947
16	0.258	0.690	1.337	1.746	2.120	2.583	2.921
17	0.257	0.689	1.333	1.740	2.110	2.567	2.898
18	0.257	0.688	1.330	1.734	2.101	2.552	2.878
19	0.257	0.688	1.328	1.729	2.093	2.539	2.861
20	0.257	0.687	1.325	1.725	2.086	2.528	2.845
21	0.257	0.686	1.323	1.721	2.080	2.518	2.831
22	0.256	0.686	1.321	1.717	2.074	2.508	2.819
23	0.256	0.685	1.319	1.714	2.069	2.500	2.807
24	0.256	0.685	1.318	1.711	2.064	2.492	2.797
25	0.256	0.684	1.316	1.708	2.060	2.485	2.787
26	0.256	0.684	1.315	1.706	2.056	2.479	2.779
27	0.256	0.684	1.314	1.703	2.052	2.473	2.771
28	0.256	0.683	1.313	1.701	2.048	2.467	2.763
29	0.256	0.683	1.311	1.699	2.045	2.462	2.756
30	0.256	0.683	1.310	1.697	2.042	2.457	2.750
40	0.255	0.681	1.303	1.684	2.021	2.423	2.704
60	0.254	0.679	1.296	1.671	2.000	2.390	2.660
120	0.254	0.677	1.289	1.658	1.980	2.358	2.617
∞	0.253	0.674	1.282	1.645	1.960	2.326	2.576