

## 폭풍압 및 소음의 실측치와 예측치의 상관관계 검토

박준호<sup>1)</sup>, 강추원<sup>2)</sup>

### Study of Interrelation between the Predicted and Measured Results of Air Blast and Blast Noise

Jun-Ho Park and Choo-Won Kang

**Abstract** : The excavation of ground by blasting is widely accepted during construction of the various infrastructures because the cost is relatively low and its process is simple. Although the ground vibration accompanied by the blasting has drawn many theoretical and experimental research interests, the environmental influence of the air blast tends to be overlooked. This means the noise produced from construction sites have been neglected academically even though it is very controversial and hypersensitive case causing many conflicts in environmental problems. In the light of this, this study explores a way of calculation of air blast. Specifically, we measure the actual air blast and explosive noise, and then make the predicted formula of them based on the change of charge per delay using regression analysis. The comparison with the predicted and measured results helps to determine the validity of estimated formula.

**Key words** : noise, air blast, regression analysis

**초 록** : 발파는 지반굴착 시 경제적으로 우수하고 과정이 간편하기 때문에 다양한 지반시설, 건축물에 널리 적용된다. 발파에 의한 지반진동은 많은 실험과 연구로 제시되었지만 폭풍압에 의한 환경적 영향은 간과하는 경향이 있다. 환경문제 대립의 경우에 지나치게 민감하고 논쟁의 여지가 있는 구조물에 대한 소음은 발파분야에서 무시되는 경향이 있다. 이에 비추어 이 연구는 폭풍압의 예상 진행방향을 조사하였다. 실제 폭풍압과 소음을 측정하고 회귀분석을 사용한 지반당 장약량에 기초를 두고 확실한 추정식을 만들었다. 추정식과 실제 결과치의 비교는 추정식의 타당성을 결정하는데 도움이 될 것이다.

**핵심어** : 소음, 폭풍압, 회귀분석

#### 1. 서 론

최근에는 도심지에서의 재건축공사, 지하철공사 및 도로공사 등과 관련하여 발파공해(진동, 소음 및 폭풍압)에 의한 물질적 보상뿐만 아니라 정신적 피해에 대한 법정소송이 제기되는 등 민원의 수준이 상당히 심각한 상태이다. 이

와 같은 문제점을 해결하기 위하여 지금까지 국내외의 여러 학자 및 기관 등에 의하여 폭풍압 및 발파소음을 정량적으로 추정하기 위하여 많은 연구가 이루어져 왔으나(Crandell, 1949; Heckman and Hagerty, 1978) 실무적인 관점에서 이러한 추정식들은 일정 지역에 국한되거나 넓은 범위에 적용하는 포괄적인 식들이어서 제한적으로 이용되는 경우가 많고 현장 적용 시 실측된 결과와 예상치의 차이가 크게 나타나고 있다. 따라서 본 연구에서는 폭풍압 및 발파소음을 실제로 측정하고 회귀분석을 이용하여 장약량의 변화에 따른 폭풍압 및 발파소음의 추정식을 산출하였으며 이것을 실제값과 비교하여 예측식의 타당성을 검토해 보고자 한다.

1) 무진네오테크(주)

2) 조선대학교

\* Corresponding author : zzea03@paran.com

접수일 : 2007년 11월 12일

게재승인일 : 2007년 12월 22일

2. 이론적 배경

2.1 폭풍압의 기초이론

발파에 의해 발생하는 폭풍 즉, 폭풍압(air blast)은 발파에 의해 생성되는 공기 압력파이다. 지반진동과 마찬가지로 이러한 압력파는 이력으로 나타낼 수 있다. 이 압력파의 고주파수 영역은 귀로 들을 수 있고 저주파수 영역은 들을 수 없으나, 구조물을 여기(勵起)하고, 이어서 구조물 내에 2차적으로 진동하는 가청 소음을 만든다(김재극, 1986; 기와 김, 1998; 강추원, 2005).

2.2 회귀방정식의 신뢰성

추정된 회귀방정식이 어느 정도 믿을 만한가, 주어진 자료들을 어느 정도 잘 설명해 주고 있으며 예측할 때 어느 정도 정확 한가 등을 검토하는 척도로 다음과 같은 방법이 있다.

- 분산분석표에 의한 F-검정
- 결정계수(coefficient of determination)
- 잔차평균제곱(residual mean squares)
- 추정된 회귀계수들의 분산
- 종속변수의 추정량  $\hat{Y}$ 의 분산

분산분석표에 의한 F-검정

회귀모형에 대한 분산분석은 총변동을 회귀식에 의하여 설명되는 변동과 설명이 안되는 잔차에 의한 변동으로 나누는 것부터 시작된다. 독립변수가 k개인 일반적인 중회귀모형에서 이들 변동이 어떻게 행렬로 표시되는가를 살펴보면 다음과 같다.

총변동은 총제곱합(total sum of squares, SST)으로,

$$SST = \sum(Y_i - \bar{Y})^2 = \sum Y_i^2 - n(\bar{Y})^2 = Y'Y - n(\bar{Y})^2 \tag{1}$$

이 된다. 여기서  $n(\bar{Y})^2$ 을 수정항이라 하며, 다음과 같이 행렬표현이 가능하다.

$$n(\bar{Y})^2 = \frac{1}{n}(\sum Y_i)^2 = Y' \left(\frac{J}{n}\right) Y \tag{2}$$

여기서 J행렬은 모든 요소가 1인  $n \times n$  행렬을 의미한다. 따라서 총 제곱합 SST는 다음과 같이 표현된다. SST에 대한 자유도는  $n-1$ 이 된다.

$$SST = Y'Y - n(\bar{Y})^2 = Y' \left[ I - \frac{J}{n} \right] Y \tag{3}$$

다음으로 잔차제곱합(sum of squares due to residual error, SSE)은 다음과 같다.

$$\begin{aligned} e &= (I - H)Y \text{이므로,} \\ SSE &= \sum(Y_i - \hat{Y}_i)^2 = \sum e_i^2 = e'e \\ &= [(I - H)Y]' [(I - H)Y] \\ &= Y'(I - H)'(I - H)Y \\ &= Y'(I - H)Y \end{aligned} \tag{4}$$

가 됨을 알 수 있다. SSE에 대한 자유도는  $n-k-1$ 이 된다.

결정계수

결정계수는 회귀방정식에 의하여 설명되는 변동 SSR이 총변동 SST에 비해 어느 정도인가를 나타내 주는 값이다. 만약 모든 측정값  $Y_i$ 가 추정값  $\hat{Y}_i$ 과 일치한다면  $SSE=0$ 이 되며  $R^2=1$ 이 된다. 실제로  $R^2=1$ 이 되는 경우는 거의 없으며  $R^2$ 의 값이 1에 가까운 값을 가지며 추정된 회귀식이 관찰점들을 잘 설명해 주고 있으며,  $R^2$ 의 값이 0에 가까운 작은 값을 가지면 그와 같은 회귀식을 추정하는 의미는 거의 없다고 할 것이다. 단순회귀모형에서 결정계수는 두 변수의 상관계수의 제곱과 같지만, 중회귀모형의 결정계수는 반응변수  $Y_i$ 와 추정값  $\hat{Y}_i$ 의 상관계수의 제곱과 같으며, 결정계수의 제곱근  $R = \sqrt{R^2}$ 을 일반적으로 중상관계수(multiple correlation coefficient)라고 한다.

**잔차평균제곱**

잔차평균제곱, MSE는

$$MSE = \frac{SSE}{n-k-1} = \frac{\sum (Y_i - \widehat{Y}_i)^2}{n-k-1} \quad (5)$$

로, 잔차들  $Y_i - \widehat{Y}_i$ 의 제곱합을 자유도로 나눈 값이다. MSE의 기대값  $E(MSE) = \sigma^2$ 으로 MSE는  $\sigma^2$ 의 불편추정량이 된다. MSE의 값이 작으면 작을수록 관찰값  $Y_i$ 들이 추정값  $\widehat{Y}_i$ 과 차이가 거의 없다는 것을 의미하며, 결국 추정된 회귀방정식을 믿을 수 있게 된다.

**추정된 회귀계수들의 분산**

회귀계수벡터  $\beta' = (\beta_0, \beta_1, \beta_2, \dots, \beta_k)$ 의 정확한 추정이 무엇보다 중요한 경우가 있다.  $\beta$ 의 추정량  $b$ 에 대하여 알아보면 다음과 같다.

$$\begin{aligned} E(b) &= E[(X'X)^{-1}X'Y] \\ &= (X'X)^{-1}X'E(Y) \\ &= (X'X)^{-1}X'X\beta = \beta \end{aligned} \quad (6)$$

이므로  $b$ 는  $\beta$ 의 불편추정량이며,  $b$ 의 분산-공분산 행렬은

$$\begin{aligned} Var(b) &= Var[(X'X)^{-1}X'Y] \\ &= (X'X)^{-1}X'[Var(Y)]X(X'X)^{-1} \\ &= (X'X)^{-1}X'(I\sigma^2)X(X'X)^{-1} \\ &= (X'X)^{-1}X'X(X'X)^{-1}(I\sigma^2) \\ &= (X'X)^{-1}\sigma^2 \end{aligned} \quad (7)$$

이다. 그런데  $Var(b)$ 는 벡터  $b$ 의 구성원들 간의 분산과 공분산을 나타내는 행렬이므로, 식 (7)의  $(X'X)^{-1}$  행렬의 구성원을  $c_{ij} (i, j = 0, 1, 2, \dots, k)$ 라 하면 다음과 같이 쓸 수 있다.

$$\begin{aligned} Var(b_i) &= C_{ii}\sigma^2, \quad (i = 0, 1, 2, \dots, k) \\ Cov(b_i, b_j) &= c_{ij}\sigma^2, \quad (i \neq j) \end{aligned} \quad (8)$$

만약 우리가 특별히 관심 있는 독립변수가  $X_i$ 라 하면  $b_i$ 의 분산이 작아지는 회귀방정식이 요구될 것이며,  $c_{ii}$ 의 값이 크지 않도록 계획행렬(design matrix)  $X$ 를 설계해 줄 필요가 있을 것이다.  $X$ 행렬의 설계에 따라서  $Var(b)$ 가 크게 달라지기 때문이다.

**종속변수의 추정량  $\widehat{Y}$ 의 분산**

중회귀모형이 최소제곱법에 의하여  $\beta_i$ 들이 추정된 후, 어떤 주어진  $(x_1, x_2, \dots, x_k)$ 의 값에서  $E(Y)$ 의 값을 예측하고자 할 때, 이의 추정량

$$\widehat{Y} = b_0 + b_1x_1 + b_2x_2 + \dots + b_kx_k$$

의 분산을 알아보면 다음과 같다.

$$\widehat{Y} = (1, x_1, x_2, \dots, x_k) \begin{pmatrix} b_0 \\ b_1 \\ b_2 \\ \vdots \\ b_k \end{pmatrix} = x'b \quad (9)$$

에서  $Var(b) = (X'X)^{-1}\sigma^2$ 이므로  $\widehat{Y}$ 의 분산은

$$\begin{aligned} Var(\widehat{Y}) &= Var(x'b) = x'Var(b)x \\ &= x'(X'X)^{-1}x\sigma^2 \end{aligned} \quad (10)$$

가 된다. 따라서  $\hat{Y}$ 의 분산은 주어진  $x' = (1, x_1, x_2, \dots, x_k)$  벡터에 따라 달라지며, 이 분산이 작으면 작을수록 추정방정식은 신뢰성이 높은 방정식이 된다.

### 3. 현장 실험 및 회귀분석 결과

#### 3.1 실험방법 및 측정기기

발파폭풍압의 경우 『00-00 도로 확포장 공사 현장』의 자료를 수집하여 분석하였으며, 발파소음의 경우 『0000 택지개발사업 조성공사』현장의 시험발파 결과를 분석하였다.

측정기기의 경우 타 기종의 혼용사용 시 기기간의 오차가 발생할 수 있으므로 한 회사 기종을 사용하였다.

#### 3.2 발파폭풍압의 측정 방법 및 결과

본 연구의 발파폭풍압 측정 자료 수집을 위하여 『00-00 도로 확포장 공사 현장』에서 77개의 실험 자료를 구하였다.

적용된 발파패턴은 천공경  $\varnothing 45-75(\text{mm})$ , 천공장  $3.0-9.0(\text{m})$ , 지발당장약량  $1.6-16.0(\text{kg}/\text{delay})$ 의 조건으로 실시되었다. 사용된 화약류는  $\varnothing 32\text{mm}$ ,  $\varnothing 50\text{mm}$ 의 에멀전 폭약과 MS 전기뇌관 #0-19이 사용되었으며 지반진동 및 발파폭풍압의 측정은 최 인근에 위치한 보안물건 3개소에서 측정하였다(Fig. 1 참조). Table 1에는 발파폭풍압 측정 결과가 표시되어 있다.

#### 3.3 발파소음의 측정 방법

발파소음 측정 자료는 『0000 택지개발사업 조성공사』현장의 암반 제거작업에서 12회의 시험발파로부터 결과를 얻었다.

1-3회는 천공경  $\varnothing 45\text{mm}$ , 천공장  $2,000\text{mm}$ , 저항선  $800\text{mm}$ , 공간격  $800\text{mm}$ , 지발당 장약량  $0.32\text{kg}/\text{delay}$ 로 실시되었다. 4-6회는 천공경  $\varnothing 45\text{mm}$ , 천공장  $2,700\text{mm}$ , 저항선  $1,000\text{mm}$ , 공간격  $1,200\text{mm}$ , 지발당 장약량  $1.0\text{kg}/\text{delay}$ 로 실시되었다. 7-9회는 천공경  $\varnothing 75\text{mm}$ , 천공장  $3,200\text{mm}$ , 저항선  $1,000\text{mm}$ , 공간격  $1,200\text{mm}$ , 지발당 장약량  $2.0\text{kg}/\text{delay}$ 로 실시되었다. 그리고 10-12회는 천공경  $\varnothing 75\text{mm}$ , 천공장  $5,700\text{mm}$ , 저항선  $1,700\text{mm}$ , 공간격  $1,900\text{mm}$ , 지발당 장약량  $5.0\text{kg}/\text{delay}$ 로 실시되었다. 1-6회의 경우

$\varnothing 32\text{mm}(250\text{g}/\text{EA})$ 의 에멀전 폭약을 사용하였으며, 7-12회의 경우는  $\varnothing 50\text{mm}(1,000\text{g}/\text{EA})$ 의 에멀전 폭약을 사용하였고, 또한 뇌관의 경우 MS 전기뇌관 #0-19을 사용하였다.

#### 3.4 발파소음의 측정과 분석

지발당 장약량과 거리에 따라 측정된 소음의 크기가 Table 2에 표시되어 있다.

#### 3.5 발파폭풍압 및 발파소음에 대한 회귀분석

##### 발파폭풍압의 회귀분석 결과

발파폭풍압 측정값에 대한 회귀분석 결과는 Table 3과 같다. 회귀분석의 통계량과 분산분석표는 각기 Table 4, 5와 같다.

회귀분석 통계량을 살펴보면 추정된 회귀모형에 대한 결정계수는  $0.7698$ 이고 조정된 결정계수는  $0.76674$ 임을 알 수 있다. 여기서 A값(절편)은  $2.81823$ 이고 B값(기울기)는  $-1.1$ 이다. 폭풍압의 상수  $K$ 는  $10^A$ ,  $n=B$ 의 관계가 성립되므로 계산하면  $K=658$ ,  $n=-1.1$ 이 된다.

분산분석표를 살펴보면 P-값이  $0.0001$ 이므로 유의수준  $\alpha=0.05$ 에서 검정할 때 상기 회귀분석은 유의하다고 볼 수 있다.

##### 발파소음의 회귀분석 결과

결과에 대한 회귀분석의 결과는 Table 6과 같다.

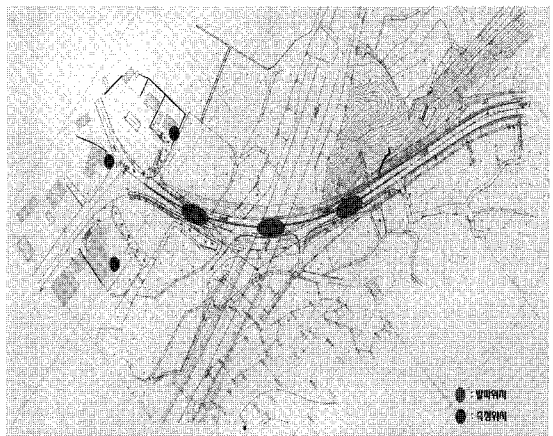


Fig. 1. Measurement locations.

Table 1. Measurement results

측정 횟수	지발당장약량 (kg/delay)	거리 (m)	폭풍압		측정 횟수	지발당장약량 (kg/delay)	거리 (m)	폭풍압	
			dB(L)	Pa				dB(L)	Pa
1	2.0	65	111.2	7.3	40	1.5	136	103.5	3.0
2	1.6	69	107.5	4.7	41	1.5	132	104.2	3.2
3	1.6	67	108.8	5.5	42	2.0	128	104.2	3.2
4	1.6	74	107.5	4.7	43	1.5	116	104.2	3.2
5	2.0	70	109.9	6.3	44	1.5	119	104.2	3.2
6	2.0	74	109.2	5.8	45	1.5	110	104.9	3.5
7	9.0	115	112.3	8.2	46	2.0	129	104.2	3.2
8	9.0	119	111.8	7.8	47	1.5	97	105.5	3.8
9	9.0	117	111.8	7.8	48	8.5	152	109.2	5.8
10	9.0	116	112.0	8.0	49	8.5	159	107.5	4.7
11	2.0	69	109.9	6.3	50	8.5	150	109.2	5.8
12	1.6	78	107.0	4.5	51	8.5	158	108.4	5.3
13	1.6	79	107.0	4.5	52	8.5	155	108.4	5.3
14	1.6	83	106.5	4.2	53	8.5	157	108.4	5.3
15	2.0	83	107.5	4.7	54	8.5	163	107.5	4.7
16	2.0	85	107.5	4.7	55	8.5	154	108.8	5.5
17	9.0	109	116.4	13.2	56	8.5	164	107.5	4.7
18	9.0	113	114.2	10.3	57	8.5	158	108.0	5.0
19	9.0	112	114.4	10.5	58	9.0	143	110.2	6.5
20	9.0	114	112.6	8.5	59	8.5	142	110.2	6.5
21	1.6	235	101.9	2.5	60	8.5	143	109.9	6.3
22	1.6	237	101.9	2.5	61	9.0	128	111.8	7.8
23	1.6	237	101.9	2.5	62	9.0	132	111.5	7.5
24	2.0	239	102.8	2.8	63	9.5	112	116.4	13.2
25	9.0	236	106.0	4.0	64	9.0	114	112.3	8.2
26	9.0	237	106.0	4.0	65	9.0	116	112.0	8.0
27	9.0	239	105.5	3.8	66	8.0	100	117.4	14.8
28	9.0	240	104.9	3.5	67	16.0	106	120.1	20.2
29	2.0	235	102.8	2.8	68	8.0	95	117.8	15.5
30	1.6	237	101.0	2.2	69	8.0	93	119.8	19.5
31	1.6	239	101.0	2.2	70	8.0	97	117.6	15.2
32	2.0	240	102.8	2.8	71	2.0	93	106.0	4.0
33	9.0	237	106.0	4.0	72	2.0	89	106.5	4.2
34	9.0	239	104.9	3.5	73	2.0	87	107.0	4.5
35	9.0	238	105.5	3.8	74	8.0	72	121.0	22.4
36	9.0	240	104.9	3.5	75	2.0	52	115.2	11.5
37	2.0	159	103.5	3.0	76	2.0	64	111.2	7.3
38	2.0	159	102.8	2.8	77	2.0	65	110.9	7.0
39	2.0	157	103.5	3.0					

Table 2. Measurement results

측정횟수	지발당장약량 (kg/delay)	거리 (m)	소음 [dB(A)]	측정횟수	지발당장약량 (kg/delay)	거리 (m)	소음 [dB(A)]
1	0.32	20	85.0	7	2.0	21	87.6
		30	80.6			36	82.4
		40	74.8			50	78.4
		50	76.0			65	76.4
		60	71.0			80	69.4
2	0.32	21	81.8	8	2.0	20	88.2
		31	79.4			35	80.0
		41	74.2			50	76.6
		51	73.4			65	76.6
		61	71.4			80	79.0
3	0.32	22	79.8	9	2.0	33	81.6
		32	78.4			48	77.8
		42	74.2			63	71.6
		52	75.8			78	73.6
		62	66.6			93	65.4
4	1.0	15	92.6	10	5.0	20	93.2
		25	86.6			35	82.6
		35	79.4			50	79.2
		45	80.4			65	78.0
		55	72.8			80	68.2
5	1.0	9	95.2	11	5.0	29	86.4
		18	90.8			44	81.6
		28	85.8			59	76.0
		38	83.8			74	74.8
		48	78.6			89	67.0
6	1.0	15	86.4	12	5.0	28	90.2
		25	86.0			42	82.6
		34	79.6			57	76.2
		44	78.6			72	76.2
		54	70.4			87	67.4

Table 3. The results of regression analysis for air blast

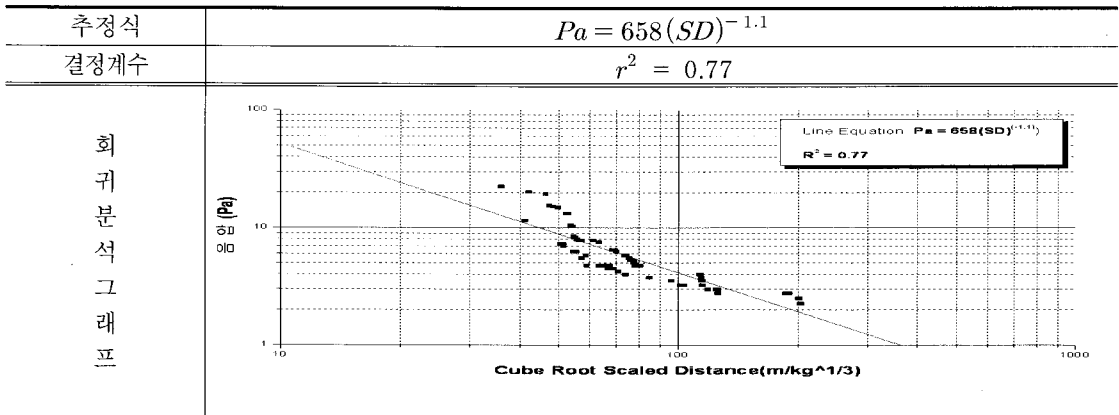


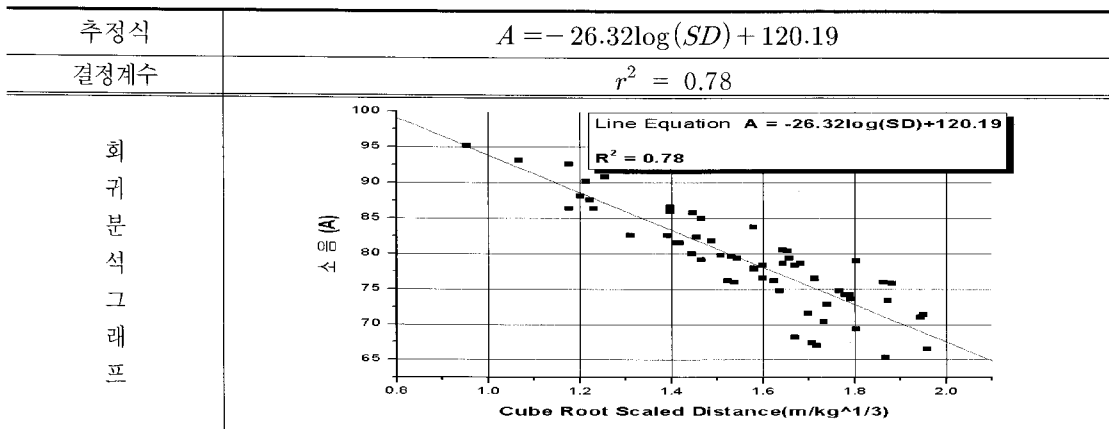
Table 4. Regression analysis statistic

parameter	value	error	t-value	prob >  t
A	2.81823	0.13264	21.2466	<0.0001
B	-1.10045	0	-15.837	<0.0001
R	R-squar e(COD)	Adj. R-square Root-MSE(SD)	N	
	-0.87739	0.7698	0.76674	0.11474 77

Table 5. Analysis of variation table

item	Degrees of freedom	sum of squares	Mean square	F statistic
Model	1	3.30226	3.30226	250.81055
Error	75	0.98748	0.01317	
Total	76	4.28974		
Prob>F				
<0.0001				

Table 6. The results of regression analysis for blast noise



회귀분석의 통계량과 분산분석표는 각기 Table 7, 8과 같다.

Table 7. Results of statistic in regression analysis

parameter	value	error	t-value	prob >  t
A	120.19267	2.90494	41.37529	<0.0001
B	-26.32416	1.83227	-14.36697	<0.0001
R	R-squar e(COD)	Adj. R-square Root-MSE(SD)	N	
	-0.88354	0.78064	0.77686	3.24339 60

Table 8. Analysis of variation table

item	Degrees of freedom	sum of squares	Mean square	F statistic
Model	1	2171.34239	2171.34239	206.40985
Error	58	610.13494	10.51957	
Total	59	2781.47733		
Prob>F				
<0.0001				

회귀분석 통계량을 살펴보면 추정된 회귀모형에 대한 결정계수는 0.78064이고 조정된 결정계수는 0.77686임을 알 수 있다.

분산분석표를 살펴보면 P-값이 0.0001이므로 유의수준  $\alpha=0.05$ 에서 검정할 때 상기 회귀분석은

유의하다고 볼 수 있다.

발파폭풍압 및 발파소음에 대한 실측치와 회귀식을 통한 예측치가 각기 Table 9, 10에 나타나 있다.

Table 9. Measured & predicted results for air blast

측정횟수	실측치	예측치		측정횟수	실측치	예측치	
		dB(L)	Pa			dB(L)	Pa
1	111.2	116.2	13.0	35	105.5	111.5	7.5
2	107.5	114.7	10.9	36	104.9	111.4	7.5
3	108.8	115.0	11.2	37	103.5	108.5	5.3
4	107.5	114.1	10.2	38	102.8	108.5	5.3
5	109.9	115.6	12.0	39	103.5	108.6	5.4
6	109.2	115.1	11.4	40	103.5	108.6	5.4
7	112.3	117.8	15.5	41	104.2	108.8	5.5
8	111.8	117.5	15.0	42	104.2	110.4	6.6
9	111.8	117.7	15.3	43	104.2	110.0	6.3
10	112.0	117.7	15.4	44	104.2	109.7	6.1
11	109.9	115.7	12.2	45	104.9	110.4	6.6
12	107.0	113.7	9.7	46	104.2	110.3	6.5
13	107.0	113.6	9.5	47	105.5	111.5	7.5
14	106.5	113.1	9.1	48	109.2	115.1	11.4
15	107.5	114.1	10.2	49	107.5	114.7	10.9
16	107.5	113.9	9.9	50	109.2	115.3	11.6
17	116.4	118.3	16.4	51	108.4	114.8	11.0
18	114.2	118.0	15.8	52	108.4	115.0	11.2
19	114.4	118.0	15.9	53	108.4	114.9	11.1
20	112.6	117.9	15.7	54	107.5	114.5	10.7
21	101.9	104.1	3.2	55	108.8	115.0	11.3
22	101.9	104.1	3.2	56	107.5	114.5	10.6
23	101.9	104.1	3.2	57	108.0	114.8	11.0
24	102.8	105.0	3.5	58	110.2	115.9	12.5
25	106.0	111.6	7.6	59	110.2	115.7	12.2
26	106.0	111.5	7.5	60	109.9	115.7	12.1
27	105.5	111.5	7.5	61	111.8	116.9	14.0
28	104.9	111.4	7.5	62	111.5	116.6	13.5
29	102.8	105.1	3.6	63	116.4	118.3	16.4
30	101.0	104.1	3.2	64	112.3	117.9	15.7
31	101.0	104.0	3.2	65	112.0	117.7	15.4
32	102.8	104.9	3.5	66	117.4	118.5	16.8
33	106.0	111.5	7.5	67	120.1	121.0	22.4
34	104.9	111.5	7.5				



Table 10. Measured & predicted results for blast noise

측정횟수	지발당장약량 (kg/delay)	거리 (m)	소음 [dB(A)]		측정횟수	지발당장약량 (kg/delay)	거리 (m)	소음[dB(A)]	
			실측치	예측치				실측치	예측치
1	0.32	20	85.0	81.6	7	2.0	21	87.6	88.0
		30	80.6	77.0			36	82.4	81.9
		40	74.8	73.7			50	78.4	78.1
		50	76.0	71.1			65	76.4	75.1
		60	71.0	69.0			80	69.4	72.7
2	0.32	21	81.8	81.0	8	2.0	20	88.2	88.6
		31	79.4	76.6			35	80.0	82.2
		41	74.2	73.4			50	76.6	78.1
		51	73.4	70.9			65	76.6	75.1
		61	71.4	68.9			80	79.0	72.7
3	0.32	22	79.8	80.5	9	2.0	33	81.6	82.9
		32	78.4	76.2			48	77.8	78.6
		42	74.2	73.1			63	71.6	75.5
		52	75.8	70.7			78	73.6	73.0
		62	66.6	68.7			93	65.4	71.0
4	1.0	15	92.6	89.2	10	5.0	20	93.2	92.1
		25	86.6	83.4			35	82.6	85.7
		35	79.4	79.5			50	79.2	81.6
		45	80.4	76.7			65	78.0	78.6
		55	72.8	74.4			80	68.2	76.2
5	1.0	9	95.2	95.1	11	5.0	29	86.4	87.8
		18	90.8	87.1			44	81.6	83.1
		28	85.8	82.1			59	76.0	79.7
		38	83.8	78.6			74	74.8	77.1
		48	78.6	75.9			89	67.0	75.0
6	1.0	15	86.4	89.2	12	5.0	28	90.2	88.2
		25	86.0	83.4			42	82.6	83.6
		34	79.6	79.9			57	76.2	80.1
		44	78.6	76.9			72	76.2	77.4
		54	70.4	74.6			87	67.4	75.3

4. 측정치와 예측치의 상관관계 검토

4.1 발파폭풍압의 측정치와 예측치의 상관관계 검토

폭풍압에 대한 실측치와 예측치의 관계를 나타내면 Fig. 2와 같으며 통계분석 결과는 Table 11과 같다.

두 값에 대한 상관관계식을 식(11)과 같이 나타낼 수 있다.

예측치  $[dB(L)] = -5.14093 + 1.00123$   
 실측치  $[dB(L)] (R^2 = 0.83778)$  (11)

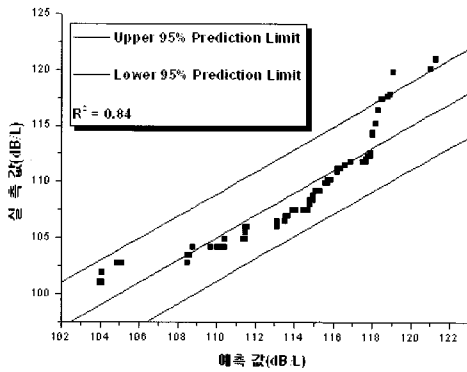


Fig. 2. Relationship between the measured and predicted air blast.

Table 11. Regression analysis statistic

parameter	value	error	t-value	prob>  t
A	-5.14093	5.78009	-0.88942	0.37662
B	1.00123	0.05087	19.68103	<0.0001
R	R-square	Adj. R-square	R-square	N
	e(COD)	Root-MSE(SD)		
	0.9153	0.83778	0.83562	1.92647
item	Degrees of freedom	sum of squares	Mean square	F statistic
Mode	1	1437.54762	1437.54762	387.34314
Error	75	278.3477	3.7113	
Total	76	1715.89532		
Prob>F				<0.0001

분산분석표에서 F-값이 387.34314이고 이에 대응하는 p-값이 0.0001임을 알 수 있다. 유의수준  $\alpha=0.05$ 에서 검정할 때 'p-값< $\alpha$ '이므로 회귀직선식은 유의하다고 할 수 있다.

4.2 발파소음의 측정치와 예측치의 상관관계 검토

발파음의 실측치와 예측치의 관계를 나타내면 Fig. 3과 같으며 그에 대한 통계량 및 분산분석표는 Table 12와 같다.

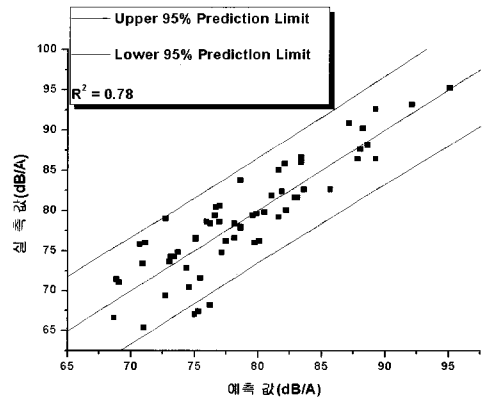


Fig. 3. Relationship between the measured and predicted blast noise.

Table 12. Regression analysis statistic

parameter	value	error	t-value	prob>  t
A	2.21466	5.50724	4.02136	1
B	E-5	0.0696	E-6	<0.0001
R	R-square	Adj. R-square	R-square	N
	(COD)	Root-MSE(SD)		
	0.088354	0.78064	0.77686	3.24339
item	Degrees of freedom	sum of squares	Mean square	F statistic
Mode	1	2171.3424	2171.3424	206.40985
Error	58	610.134	10.5195	
Total	59	94	7	
Prob>F				<0.0001

두 값들에 대한 상관관계식은 식 (12)와 같다.

$$\begin{aligned} \text{예측치} &= (2.21466E-5) + \text{실측치} [dB(A)] \\ (R^2 &= 0.78064) \end{aligned} \quad (12)$$

$$\text{예측치} [dB(L)] = -5.14093 + 1.00123$$

$$\times \text{실측치} [dB(L)] \quad (R^2 = 0.83778)$$

- 발파소음에 대한 예측치

$$\text{예측치} [dB(A)] = (2.21466E-5) +$$

$$\text{실측치} [dB(A)] \quad (R^2 = 0.78064)$$

분산분석표에서 F-값이 206.40985이고 이에 대응하는 p-값이 0.0001임을 알 수 있다. 유의수준  $\alpha=0.05$ 에서 검정할 때 'p-값< $\alpha$ '이므로 회귀직선식은 유의하다고 할 수 있다.

### 5. 결론

일반적인 노천발파 현장에서 발파로 인하여 발생하는 폭풍압 및 발파소음을 측정하여 그 결과를 토대로 회귀분석을 실시하였다. 도출된 예측식의 신뢰성을 판단하기 위하여 회귀분석을 실시하였으며, 주요 결과를 요약하면 다음과 같다.

1) 현장에서 실측된 폭풍압 및 발파진동에 대한 예측식은 다음과 같다.

폭풍압예측식	발파소음 예측식
$Pa = 658(SD)^{-1}$	$A = -26.32\log(SD) + 120.19$
$r^2 = 0.77$	$r^2 = 0.78$

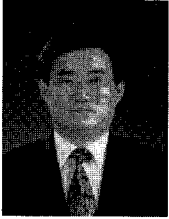
2) 폭풍압 및 발파소음에 대한 실측치와 예측치의 상관관계를 통계처리기법을 통하여 분석한 결과는 다음과 같다.

- 폭풍압에 대한 예측치

금번 연구는 1개소의 현장에서 계측한 폭풍압과 발파소음에 대하여 실시되었지만 더 많은 자료를 이용하여 실험을 실시한다면 현재 적용되고 있는 발파진동 일반식과 같은 형태의 폭풍압 예측식을 도출하여 실측값에 가까운 폭풍압 및 발파소음을 예측할 수 있을 것이다.

### 참고문헌

1. 강추원, 2005, 발파공학 A to Z, 구미서관, 서울, pp. 399.
2. 기경철, 김일중, 1998, 산학인을 위한 발파공학, 기전사, 서울, pp. 248.
3. 김재극, 1986, 산업화학파 발파공학. 서울 대학교 출판부, 서울, pp. 390.
4. Crandell, F.J., 1949, Ground Vibration due to Blasting and Its Effect upon Structures, J. of the Boston Society of Civil Engineers, Vol. 36, No. 2, pp. 124-125.
5. Heckman, W.S., and J.H. Hagerty, 1978, Vibration Associated with Pile Driving, ASCE, Vol. 104. pp. 229-231.



**강 추 원**

조선대학교 자원공학과 교수

전화 : 062)230-7117

E-mail : cwkang@mail.chosun.ac.kr



**박 준 호**

무진네오테크 설계부 과장

전화 : 02)2108-1996

E-mail : zzea03@paran.com

---