

Research Paper

도시지역 공사 시 발파 소음·진동 예측식 개발에 관한 연구

권진욱* · 이내현* · 우정하**

한국교육환경보호원*, 한국교통대학교**

A Study on the Development for Prediction Model of Blasting Noise and Vibration During Construction in Urban Area

Jinuk Kwon* · Naehyun Lee* · Jeongha Woo**

Korea Educational Environment Protection Agency*

Korea National University of Transportation**

요약: 본 연구는 인천, 수원, 원주, 양산 지역에서 발파작업 동안 취득한 320개의 발파 진동 및 발파 소음 데이터를 사용하여, 발파 진동 및 발파 소음 추정에 적용가능한 예측식을 개발하였다. 발파진동 예측식은 회귀분석 결과, SRSD 및 CRSD에 의한 상관계수가 각각 0.879, 0.890이며 두 경우 모두 $R^2 \geq 0.7$ 로 나타났다. 발파소음 예측식은 단계적 회귀분석을 수행한 결과, 상관계수는 0.911, $R^2 \geq 0.7$ 로 유의미하게 높은 상관관계를 보였다. 상수값 결정을 위한 추가 회귀분석 결과 상관계수는 0.881, $R^2 \geq 0.7$ 로 나타났다. 상기의 결과, 개발된 예측식이 다른 도시지역의 재건축사업이나 공동주택 건설에 따른 환경영향평가나 교육환경평가의 소음·진동분야 보고서 작성 시 정합성이 높은 발파소음·진동 예측값을 도출할 수 있을것으로 기대한다.

주요어: 자승근 환산거리, 삼승근 환산거리, 입지상수(K), 지발당 장약량(kg), 잔차분석, 분산분석

Abstract: This study proposed a prediction equation for the estimation of blasting vibration and blasting noise, utilizing 320 datasets for the blasting vibration and blasting noise acquired during urban blasting works in the Incheon, Suwon, Wonju, and Yangsan regions. The proposed blasting vibration prediction equation, derived from regression analysis, indicated correlation coefficients of 0.879 and 0.890 for SRSD and CRSD, respectively, with an R^2 value exceeding 0.7. In the case of the blasting noise prediction equation, stepwise regression analysis yielded a correlation coefficient of 0.911 between the prediction values and real measurements for the blasting noise, and further analysis to determine the constant value revealed a correlation coefficient of 0.881, with an R^2 value also exceeding 0.7. These results suggest the feasibility of applying the proposed prediction equations when environmental impact assessments or education environment evaluation according to urban development or apartment construction projects is performed.

Keywords: SRSD (Square Root Scaled Distance), CRSD (Cube Root Scaled Distance), Location constant (K), Weight per delay (charge) (kg), The Fitted vs. Residual Analysis, ANOVA

First Author: Jinuk Kwon, Tel: +82-43-710-4003, E-mail: abc@schoolkeepa.or.kr, ORCID: 0009-0002-0790-2181

Corresponding Author: Naehyun Lee, Tel: +82-43-710-4011, E-mail: kuknhlee@schoolkeepa.or.kr, ORCID: 0000-0002-0790-8682

Co-Author: Jeongha Woo, Tel: +82-2-6412-8001, E-mail: prowjh713@nate.com, ORCID: 0009-0008-2446-7533

Received: 11 March 2024. Revised: 11 April 2024. Accepted: 12 April 2024.

I. 서론

교육환경평가와 환경영향평가는 환경에 영향을 미치는 시행계획·실시계획 등의 인가·허가·승인 등을 결정할 때에 해당 사업이 환경에 미치는 영향을 미리 조사·예측·평가하여 해로운 환경영향을 피하거나 제거 또는 감소시킬 수 있는 방안을 마련하는 것을 말한다. 여기서, 소음·진동은 세부 평가항목 중 하나로, 평가 대상지역의 현황조사와 공사 시 학교 및 주변 정온시설에 미치는 영향을 예측하고 이에 대한 저감방안을 마련하여 교육환경평가 및 환경영향평가서에 반영한다(Lee NH et al. 2023).

도시지역 건설예정부지에 단단한 암반이 존재하여 공사를 순조롭게 진행할 수 없을 때 화약을 사용하여 발파를 수행하게 된다. 브레이크와 같은 기계의 물리적인 힘을 사용하여 암파쇄를 하는 것보다 순간적으로 터지는 힘을 이용하여 암파쇄를 하는 것이 경제적, 시간적으로 많은 장점이 있기 때문이다. 그러나 발파는 소음과 진동을 유발시키는 단점이 있어 민원이 꾸준히 발생하므로 진동과 소음을 더욱 정량적으로 제어할 수 있는 필요성이 요구되고 있다(Park YS et al. 2009).

발파 민원을 유발하는 발파공해의 주요 원인으로는 (i) 발파진동, (ii) 발파소음, (iii) 파쇄암의 비산 등을 들 수 있다. 이들은 발파장소 부근의 학교나 민가, 건물, 터널, 암사면 구조물 등에 피해를 주거나 시설물의 오작동을 일으키기도 하며, 때로는 인명피해를 가져오기도 한다. 국내의 경우 1970년대만 하더라도 발파와 관련된 민원문제는 심각한 고려 대상이 아니었으나 이후 인구밀집지역에서의 발파작업이 증가하고 경제성장과의식구조의 변화와 더불어 발파공해에 대한 민원문제가 급증하여 안전이 발파설계의 최우선적 과제로 급부상하였다(Choi BH, Ryu CH. 2015).

학생들이 생활하는 공간 중 가장 오래 머무는 공간인 학교는 학습권과 건강영향의 측면에서 정온하고 쾌적한 환경의 조성이 반드시 필요하다. 특히, 소음의 경우 정신적인 피해를 평가하기 위해서는 인체 감응도에 부합하는 소음레벨 dB(A)로 변환하여야 하며, 예민한 시기인 학생들의 학업 성취도에 영향을 줄 수 있으며, 장기간 노출될 경우 성장기인 학생들은 건강상의 영향

에 더욱 취약하다(Diaco, S. B., 2014, Shield, B. M., & Dockrell, J. E., 2008).

도시지역에서 공사 시 발파소음·진동 예측은 「산업화약과 발파공학, 서울대학교 출판부(김재국), 2002.9」 자료를 이용하여 발파소음 예측을 수행하고 있으며, 발파진동은 미광무국 발파진동 추정식을 사용하여 발파진동속도를 Kine(cm/sec)으로 제시하고 있으나 발파소음·진동 예측식이 가지고 있는 한계성으로 인하여 정확한 예측에 따른 저감방안 수립에 문제가 제기되고 있다(Lee NH et al. 2023).

환경영향평가나 교육환경평가 소음·진동분야 작성 시 도시지역 발파작업에 따른 진동 예측은 미광무국(USBM)에서 발표한 식을 근간으로 하는 암발파 설계 및 시험발파지침에서 제시하고 있는 발파진동 예측식을 적용하여 환경영향평가 및 교육환경평가서를 작성하고 있다. 2006년도 본 지침에서 제시한 발파진동 예측식은 국내 도로공사 현장의 실측 자료로부터 구한 $K = 200, n = -1.60$ 을 사용하여 예측을 수행하고 있으나 진동 예측식은 고속국도, 일반국도 및 국가지원 지방도 건설공사구간 중 노천에서 시행하는 암발파 설계 및 시공에 적용하는 식으로 도시지역 발파진동 예측에 적합성이 높은 예측을 도출하기에는 한계가 있는 실정이다. 발파소음의 경우, 미광무국(USBM) 실험식을 적용하여 음압 Peak치인 dB(L) 측정치로부터 음압레벨에 적용하여 예측을 수행하고 있으나, 우리나라 실정과는 맞지 않으며, 발파소음에 따른 정신적 피해를 평가하기 위해서는 인체 감응도에 부합하는 소음레벨

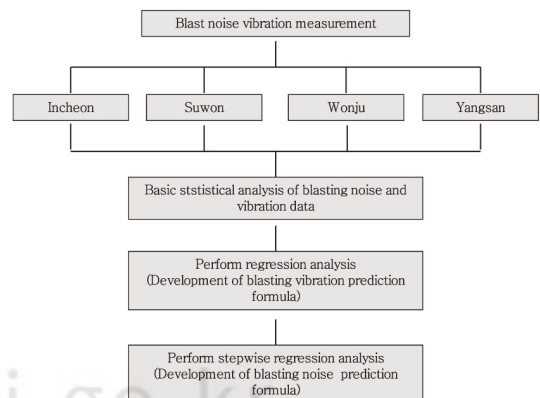


Figure 1. Research procedure chart

dB(A)로 변환하는 조치가 요구되고 있는 실정이다.

따라서, 본 연구에서는 환경영향평가나 교육환경평가서 소음·진동분야 보고서 작성 시 발파작업에 따른 소음·진동 예측을 수행하여 정운을 요하는 시설(거주지역, 학교시설 등)에서의 소음·진동 목표기준을 만족하기 위한 지발당 장약량 산정 및 저감방안 수립에 기여할 수 있을 것으로 생각되며, 본 논문의 연구절차는 Figure 1과 같다.

II. 발파소음·진동의 발생특성 및 예측방법

1. 발파소음·진동의 발생 및 전파

발파소음은 폭약이 폭발하면 에너지의 일부는 대기중으로 압력파동의 형태로 전달된다. 일반적으로 압력파동의 주파수가 사람이 들을 수 있는 가청주파수 대역(20~20,000 Hz)이면 음(sound) 또는 소음(noise)이라 하며, 압력파동의 주파수가 낮아서 가청주파수 대역 이하이면 충격음(concussion)이라 하여 우리가 들을 수 없다. 발파를 시행하면 소음 및 충격음이 발생하는데, 이들을 통틀어 발파소음(air blast)이라 한다. 이와 같은 소음의 세기, 곧 음압(sound pressure)은 대개 압력 단위(bar, Pa, psi)로도 표시할 수 있으나 환산단위인 데시벨 단위(dB)로도 많이 표시한다. 예를 들어, 거리에서 달리는 자동차가 일으키는 소음 수준은 대략 80~90dB 정도로 측정된다.

소음 또는 음압의 수준은 다음 식 (eq.1)로 환산하는데, 이 식에 의한 음압레벨(Sound Pressure Level; SPL)은 dB(L) 단위(L: Linear)로 많이 표시되며 주파수에 대해 보정을 하지 않은 값으로서 구조물에 대한 영향 평가에 많이 사용된다.

$$SPL = 20 \log_{10} \left(\frac{P}{P_0} \right) \quad (\text{eq. 1})$$

식 (eq.1)에서 : 음압(Pa), : 기준압(=20 μ Pa)이다. 마찬가지로 음압을 영미단위계의 psi (pound per square inch; lb/in²) 단위로 측정할 경우에도 위의 식(eq.1)에 의해 음압레벨(dB(L))로 환산할 수 있다. 단, 이 경우에는 식(eq.1)에서 P: 음압(psi), P₀: 기준압(=2.9 × 10⁻⁹ psi)

이 된다.

발파진동은 폭약이 장약공 내에서 폭발하면 주위 암반은 강력한 폭광충격을 받으며 폭약과 접촉한 주변의 상태는 고온·고압 하에서 용융되며 유체역학적으로 거동하는 현상을 나타낸다. 장약공의 외부는 충격압에 의하여 파쇄대가 형성되면서 동시에 에너지가 전달되어 원주방향으로 균열이 생성, 전파되는 등 여러 형태의 암반파괴를 일으킨다. 어느 범위를 지나면 에너지는 암반을 파괴시키지 못할 정도로 급격히 저하되고 응력파(탄성파)의 형태로 전파된다. 즉, 힘을 받은 질량이 변형을 계속하려 하고 암반이 지닌 강성은 변형을 원래 상태로 되돌리려 하면서 변형과 회복을 반복하는 파동의 형태로서 응력파가 전달되며, 이 응력파의 도달에 따른 지반의 반응은 진폭과 주기를 갖는 진동의 형태로 나타내는데 이를 발파진동이라 한다.

2. 발파소음·진동의 예측방법

발파소음은 미광무국의 연구결과(Siskind et al, 1980b)에 의하면 발파소음도 발파진동의 경우와 마찬가지로 다음식에서와 같은 환산거리를 사용하여 예측이 가능하다. 미광무국에서는 소음자료의 처리에 CRSD를 제안하였다.

$$P = k \left(\frac{D}{W^{1/3}} \right)^n \quad (\text{eq. 2})$$

식 (eq. 2)에서 발파소음 P는 psi나 Pa과 같은 압력단위로 표시한다. 예를 들어, psi 단위의 경우 사용되는 수치범위가 1~10⁶ 정도로 지나치게 넓어 50~170dB 정도로 좁은 범위의 로그 단위가 많이 사용된다. 즉, 식 (eq. 2)의 양변에 로그를 취하고 음압레벨(SPL)의 정의를 이용하면 다음 식이 유도된다.

$$SPL = A + B \log_{10} \left(\frac{D}{W^{1/3}} \right) \quad (\text{eq. 3})$$

환산거리에 따른 발파소음의 크기(dB(L) 단위)를 log-linear 좌표계 상에서 식 (eq. 3)에 적합시키면 측정 자료를 가장 잘 표현하는 추정식을 구할 수 있어 환산거리에 따른 발파소음의 전파경향을 예측할 수 있다. 발파소음에 대한 추정식도 발파진동의 경우와 같이

Table 1. Empirical equations proposed for the prediction of ground vibration levels

Proponent	Vibration prediction formula	Note
Morris (1950)	$a = KW^{1/2}/D$	a : Particle displacement, K : Location constant, W : Delay charge, D : Distance
Haberjam and Whetton (1952)	$a \propto W^{0.085}$	a : Particle displacement, W : Delay charge
Gustafsson (1973)	$V = K\sqrt{W/D^{3/2}}$	V : Particle velocity, W : Delay charge, D : Distance, K : Constant (400 : In Hard Rock, Sweden) ※ $W/D^{3/2}$: charging level, Langefors and Kihlstrom (1963)
Devine (1962); Devine and Duvall (1963)	$V = K(D/W^{1/2})^{-n}$	V : Particle velocity, W : Delay charge, D : Distance, K : Constant ($D/W^{1/2} = 1$; V-intercept), n : Constant ※ Application of prediction formula ; Nicholls et al. (1971); Siskind et al. (1980a)
Ambraseys and Hendron (1968); Dowding (1971)	$V = K(D/W^{1/3})^{-n}$	V : Particle velocity, W : Delay charge, D : Distance, K : Constant ($D/W^{1/2} = 1$; V-intercept), n : Constant ※ Introduction of CRSD concept ; Blair and Duvall (1954); Duvall and Petkof (1959)
Davies et al. (1964); Attewell et al. (1965)	$V = KW^aD^b$	V : Maximum particle velocity, W : Maximum Delay charge, D : Distance, K, a, b : Location constant (local geological conditions, Constants related to explosive strength)
Ghosh and Daemen (1983)	$V = K(D/W^{1/2})^{-n} e^{-\alpha D}$ $V = K(D/W^{1/3})D e^{-\alpha D}$	V : Particle velocity, W : Delay charge, D : Distance, K, n : Constant, α : Inelastic damping coefficient
Pal Roy (1991)	$V = n + L(D/W^{1/2})^{-1}$	V : Particle velocity, D : Distance, W : Maximum Delay charge, $n(<0)$: Location constant, K : Design constant (Delay charge, Distance, Spacing, Delay time et al.)

SRSD 및 CRSD로 처리한 결과 중에서 적합도가 높은 쪽을 채택할 수 있으나 건설교통부의 「도로공사 노천 발파 설계·시공 지침」이나 「요령」에서는 구체적인 방법에 대해서는 언급하지 않고 있다. 따라서 일반적으로는 과거 미광무국에서 제안한 방법에 따라 CRSD를 사용하여 회귀분석을 실시하면 충분할 것으로 판단된다. 따라서 측정된 자료의 95%를 아래로 포함하는 식을 도출하도록 한다. 따라서 현재 사용하고 있는 발파소음도의 예측은 식 (eq. 2)의 산출된 P값(폭풍압)을 상기의 식 (eq.1)의 P에 적용하여 발파소음도(dB(A))를 산정한다.

발파진동은 크기에 영향을 주는 변수들을 나열하면, (i) 화약의 종류와 장약량, 장약밀도, (ii) 폭원에서 측정 지점까지의 이격거리, (iii) 암반의 역학적 구조적 특성, (iv) 천공패턴, 장약방법, 기폭시차 및 기폭순서와 같은 발파방법 등이 있다. 즉, 발파진동은 지역적인 특성과 발파조건에 따라 그 발생수준이 달라지므로 대상 지역별로 발파조건에 따라 발파진동을 실측하여 그 전파특성을 파악하여야 한다. 이러한 다양한 영향변

수를 모두 고려하여 수치해석을 이용하여 발파진동을 예측하는 것은 어려운 일이다. 따라서, 많은 연구자들이 이 발파로 발생하는 발파진동 측정자료를 이용하여 발파진동의 수준을 실무적으로 예측하는 데에는 통계적인 방법으로 회귀분석을 사용하여 다양한 경험식들을 회귀모형으로 제안하였다. Ghosh and Daemen (1983)과 Bhandari (1997)는 당시까지 제안되었던 대표적인 경험식들을 보고한 바 있는데, 이들을 정리하면 Table 1과 같다.

Table 1에서 지금까지 발파진동의 수준을 예측하는 회귀모형들이 많이 제안되어 있지만 이들 가운데 국내 외에서 가장 많이 사용되고 있는 대표적인 것으로는 SRSD와 CRSD를 이용한 모형을 들 수 있다. SRSD를 이용한 예측식은 과거 미광무국(USBM)과 직·간접적으로 관련된 여러 연구자들(Devine and Duvall 1963; Duvall and Petkof 1959; Nicholls et al. 1971; Siskind et al. 1980a)이 제안하거나 채택한 것으로 긴 봉상장약(cylindrical charge)을 고려한 개념에서 비롯되었으며, CRSD 개념을 이용한 예측식은 발파진동이 암반 중에

Table 2. Geological condition at the blasting site

Area	Incheon	Suwon	Wonju	Yangsan
Era	Mesozoic Jurassic	Precambrian period	Mesozoic Jurassic	Mesozoic Cretaceous
Stratum	Biotite Granite	Biotite Gneiss	Macrocrystalline biotite granite	Biotite Granite
Rock quality condition	soft-rock	soft-rock	soft-rock	soft-rock~ordinary rocks
characteristic	Rock with joints	Rock joints exposed as soft rock	Some weathering and joint development	Joints and some weathering progress

서 구상으로(spherically) 전파되는 기하학적 형태를 고려한 모형이다. 이들 두 모형은 국내외에서 가장 많이 사용되어 온 대표적인 방법들이기 때문에 사용상의 편리성이나 자료의 호환성의 측면에서도 유리한 방법이라 할 수 있다. SRSD와 CRSD는 각각 폭원거리(D)를 최대 지발당장약량(W)의 SRSD와 CRSD로 환산한 형태로 정의되며, 다음 식 (eq. 4)와 (eq. 5)으로 표현된다

$$D_{S2} = \frac{D}{W^{1/2}} \quad (\text{eq. 4})$$

$$D_{S3} = \frac{D}{W^{1/3}} \quad (\text{eq. 5})$$

SRSD와 CRSD 개념을 이용한 예측식은 발파진동의 속도수준(V)이 환산거리(D_{S2} 또는 D_{S3})의 거듭제곱(n)에 따라 변화한다는 회귀모형이며, 다음 식 (eq. 6)와 (eq. 7)로 각기 표시할 수 있다. 진동의 크기는 거리가 멀어짐에 따라 감소하므로 지수 $n < 0$ 이 된다. 이와 같은 SRSD와 CRSD를 이용한 예측식은 log(로그; 진동속도)-log(로그; 환산거리) 좌표계에서는 직선이 되므로 측정자료들은 직선에 적합되어 실무적으로 사용하기가 편리한 장점이 있다.

$$V = K(D_{S2})^n = K\left(\frac{D}{W^{1/2}}\right)^n \quad (\text{eq. 6})$$

$$V = K(D_{S3})^n = K\left(\frac{D}{W^{1/3}}\right)^n \quad (\text{eq. 7})$$

상기의 식 (eq. 6)와 (eq. 7)에서 V : 발파진동의 최대입자속도(peak particle velocity), n : 감쇠지수(attenuation index), K : 화약특성, 발파방법, 암반특성 등에 따라 결정되는 상수이다.

III. 연구방법

1. 지질특성

발파소음·진동 예측식을 개발하기 위하여 공동주택 신축공사(인천, 수원, 원주) 3개 지역과 물류센터 신축공사(양산) 1개 지역을 대상으로 지질정보를 조사한 결과, 인천 연수구 옥련동 지역은 중생대 주라기, 지층은 흑운모화강암이며, 암질상태는 연암으로 절리가 있는 암반의 형태를 하고 있다. 수원시 원천동 지역은 선캄브리아, 지층은 흑운모편마암이며, 암질상태는 연암으로 노출된 암반 절리가 발생된 형태이다. 강원도 원주시 무실동 지역은 중생대 주라기, 지층은 거정질 흑운모화강암이며, 암질상태는 연암으로 일부 풍화 및 절리가 발달된 형태이다. 양산시 산막동 지역은 중생대 백악기, 지층은 흑운모화강암이며, 암질상태는 연암~보통암으로 절리 및 일부 풍화가 진행된 상태로 조사되었다.

2. 발파패턴도

데이터의 신뢰성을 높이기 위해 발파는 지역별로 총 29회(인천 6회, 수원 7회, 원주 10회, 양산 6회) 실시하였으며, 총 320개의 발파소음·진동 데이터를 수집하였다. 도시지역의 특성을 고려하여 발파패턴에 따라 미진동·정밀진동·소규모진동제어발파로 분류하였으며, 장약량은 양산지역 공당 0.48kg을 제외한 나머지 지역(인천, 수원, 원주)에서는 공당 장약량을 다르게 하여 장약량에 따른 발파소음·진동 감쇠를 고려할 수 있게 행하였다. 발파원으로부터 계측기(소음·진동계) 설치 지점까지의 거리는 25~213m이며, 총 발파공수는 106공이며, 총 장약량은 69.89kg이다.

Table 3. Pattern of blasting

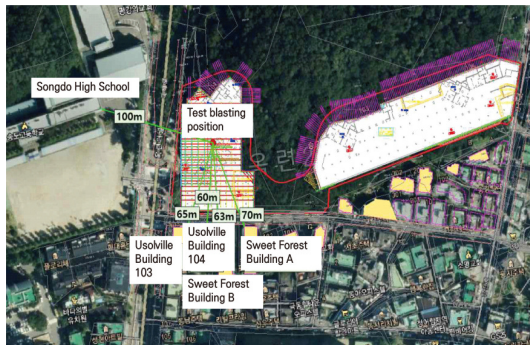
Classification	Incheon	Suwon	Wonju	Yangsan
Distance (m)	40~100	25~58	30~213	15~91
Diameter (mm)	51, 76	51	51, 76	51
Sub-drilling length (m)	1.2~3.0	1.3~1.8	2.5~2.7	2.2
Line of least resistance (m)	0.4~1.3	0.5~0.7	1.1~1.4	0.8
Sub-drilling gap (m)	0.4~1.3	0.5~0.7	1.1~1.4	0.8
Weight per delay (kg)	0.125~1.5	0.125~0.375	1.0~1.5	0.48
Explosives	New Mite Plus (ø32mm)	New Mite Plus (ø32mm)	New Mite Plus (ø32mm)	New Emulite (ø32mm)
Hole (EA)	20	28	40	18
Total weight (kg)	4.75	6.5	50.0	8.64

3. 발파소음·진동도 계측 데이터

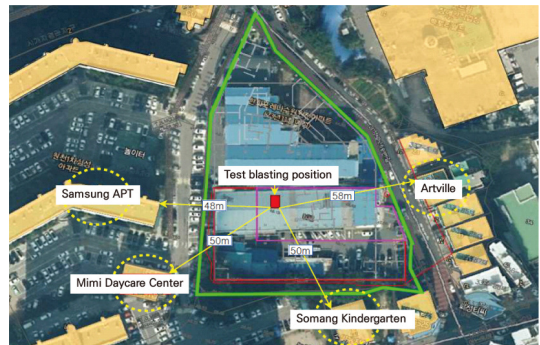
본 연구의 목적인 발파소음·진동 예측식 개발을 위하여 지역별 현장조사를 통하여 보안시설물(가옥, 상가, 축사, APT, 학교 등)에 대하여 소음·진동 계측기를 설치하여 시험발파를 수행하였다(Figure 2 참고). 각 지역(인천(60), 수원(70), 원주(106), 양산(72))별 소음·진동

도 계측 데이터는 총 320개의 데이터를 수집하였으며, 이중에서 Trigger level 0.010~0.013cm/sec 이하의 지반 진동이 발생하여 계측이 이루어지지 않은 12개(미검측: No Triggered(N/T))의 데이터를 제외한 308개의 데이터를 대상으로 예측식을 개발하였다.

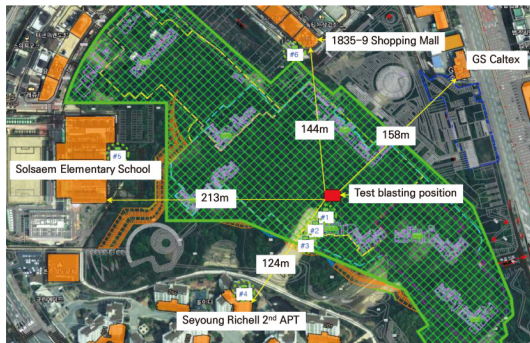
발파소음은 주로 발파원으로부터의 거리, 지발당장



Incheon



Suwon



Wonju



Yangsan

Figure 2. Locations of the study area (Test blasting position)

약량, 전색길이, 압질, 발파매트 사용여부 등에 영향을 받으며, 발파지점의 지형 및 건물형태(반사음의 영향 등), 온도, 풍속과 풍향 등의 기상조건 등도 큰 요인으로 작용하기 때문에 예측식 추정에 상당한 어려움이 있다. 기존의 현장에서의 실측치와 추정치를 비교 검토한 결과 상당한 편차를 보이는 것으로 나타났으며, 발파음압을 소음레벨로 환산함에 있어서도 아직까지는 그다지 신뢰도가 높은 방식이 제시되지 않은 것으로 평가되고 있다.

국내 발파현장에서는 사용기기의 특성상 보통 음압 Peak치인 dB(L)이 측정치로서 제시되고 있으나, 발파 소음에 따른 정신적 피해를 평가하기 위해서는 인체 감응도에 부합하는 소음레벨 dB(A)로 변환하여야 한다. 따라서, 본 연구에서는 시험발파 시 최대 진동속도(Kine)와 발파소음 Peak치인 dB(A)로 측정을 수행하여 데이터를 확보하였다.

발파진동은 Table 1에 제시한 기존 경험식들의 적합성에 대하여 전문가들이 서로 다른 견해를 보이기도 하지만, 발파진동 예측식의 선택문제와 관련하여 Siskind (2000)는 발파진동의 수준을 실무적으로 예측하는 데에는 SRSD나 CRSD 어느 쪽을 사용해도 무방하다고 보았으며, Snodgrass와 Siskind (1974)는 특정 현장에 적합한 것이라면 이들 두 가지 방법 외에 어떠한 예측식을 사용하여도 좋은 것으로 보았다. 따라서 진동의 수준을 예측하는 문제는 어떠한 예측식을 사용하느냐의 문제라기보다는 주어진 예측식을 사용했을 때 나타나는 결과의 산포도, 곧 적합성(상관성)이 얼마나 높은지의 문제라 할 수 있다(Siskind, 2000).

4. 통계적 분석

미광무국식을 바탕으로 발파소음·진동 예측식 개발과 검증을 위하여 펜실베이니아 주립대학에서 1972년 연구원인 Barbara F. Ryan, Thomas A. Ryan, Jr. 및 Brian L. Joiner가 개발한 통계 패키지인 Minitab 18.0 Version for window 프로그램을 이용하여 (i) 기초통계(Basic statistics), (ii) 회귀분석(Regression analysis), (iii) 잔차분석(Residual analysis), (iv) 상관분석(Correlation analysis) 등을 수행하여 발파소음·진동 예측식을 제안하였다.

IV. 연구결과

1. 계측 데이터 기초통계(Basic statistics)

시험발파에 의한 발파소음·진동 예측식을 개발하기 위하여 계측을 수행하였으며, 인천지역의 계측은 발파원으로부터의 이격거리는 40~100m, 최대지발당 장약량은 0.125~1.5kg, 기폭공수는 2~4공, 방호매트를 설치 후 계측(폭발 시 Peak치 소음도 dB(A)와 최대 진동속도(Kine = cm/sec) 동시 계측)을 실시한 결과, 총 60개의 데이터를 분석한 결과, 평균 최대 소음·진동도는 65.130dB(A)(0.060Kine), 표준편차 3.720dB(A)(0.034 Kine), 소음·진동도 분포는 58.100~71.600dB(A)(0.022~0.175Kine), 중위수는 65.600dB(A)(0.051Kine)로 분석되었다.

수원지역의 계측은 발파원으로부터의 이격거리는 25~58m, 최대지발당 장약량은 0.125~0.375kg, 기폭공수는 4공, 방호매트를 설치 후 계측(폭발 시 Peak치 소음도 dB(A)와 최대 진동속도(Kine = cm/sec) 동시 계측)을 실시한 결과, 총 70개의 데이터를 분석한 결과, 평균 최대 소음·진동도는 60.854dB(A)(0.059Kine), 표준편차 6.906dB(A)(0.047Kine), 소음·진동도 분포는 50.000~75.500dB(A)(0.013~0.191Kine), 중위수는 58.900dB(A)(0.044Kine)로 분석되었다.

원주지역의 계측은 발파원으로부터의 이격거리는 30~213m, 최대지발당 장약량은 1.0~1.5kg, 기폭공수는 4공, 방호매트를 설치 후 계측(폭발 시 Peak치 소음도 dB(A)와 최대 진동속도(Kine = cm/sec) 동시 계측)을 실시한 결과, 총 106개의 데이터를 분석한 결과, 평균 최대 소음·진동도는 65.498dB(A)(0.178Kine), 표준편차 10.356dB(A)(0.262Kine), 소음·진동도 분포는 47.600~80.600dB(A)(0.010~1.029Kine), 중위수는 67.900dB(A)(0.059Kine)로 분석되었다.

양산지역의 계측은 발파원으로부터의 이격거리는 15~91m, 최대지발당 장약량은 0.48kg, 기폭공수는 2~4공, 방호매트를 설치 후 계측(폭발 시 Peak치 소음도 dB(A)와 최대 진동속도(Kine = cm/sec) 동시 계측)을 실시한 결과, 총 72개의 데이터를 분석한 결과, 평균 최대 소음·진동도는 68.289dB(A)(0.364Kine), 표준편차 9.850dB(A)(0.420Kine), 소음·진동도 분포는 50.000

Table 4. Blasting data of basic statistics

Variable	Measuring Site	N	Average	Std. d	Min	Median	Max
PPV (cm/sec)	Incheon	30	0.060	0.034	0.022	0.051	0.175
	Suwon	35	0.059	0.047	0.013	0.044	0.191
	Wonju	53	0.178	0.262	0.010	0.059	1.029
	Yangsan	36	0.364	0.420	0.042	0.146	1.359
Noise (dB(A))	Incheon	30	65.130	3.720	58.100	65.600	71.600
	Suwon	35	60.854	6.906	50.000	58.900	75.500
	Wonju	53	65.498	10.356	47.600	67.900	80.600
	Yangsan	36	68.289	9.850	50.000	70.800	88.200

Note : N ; sample, Std. d : Standard deviation, Min : minimum, Max : Maximum

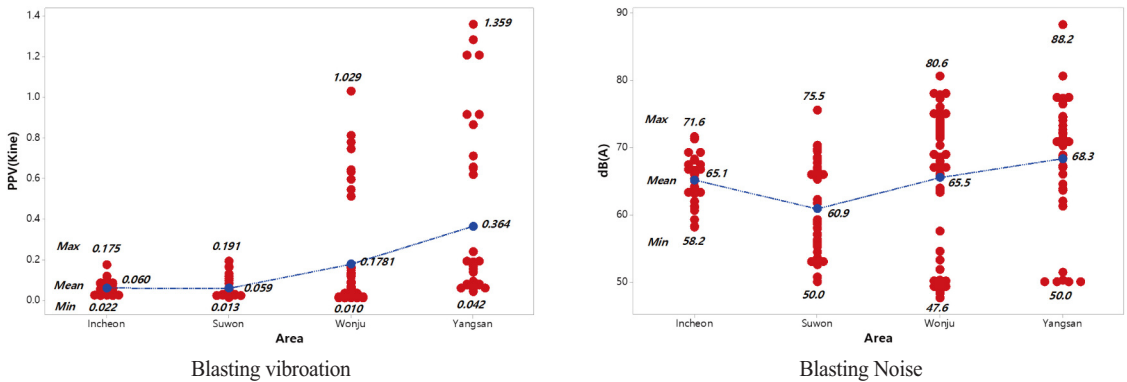


Figure 3. Individual value plot (Test blasting (Noise & Vibration))

~88.200dB(A)(0.042~1.359Kine), 중위수는 70.8dB(A) (0.146Kine)로 분석되었다.

2. 발파진동 예측식 개발

발파진동은 주로 장약량(Charge weight)과 이격거리 (Distance)에 의해 결정되고 기타의 요인들은 발파지역의 특정한 발파상수(Blasting constant)로 결정된다. 장약량은 동시에 폭발하는 폭약량이나 지발당 사용되는 폭약량(Charge per delay)을 뜻하고 거리는 발파점 또는 폭원에서 측정이나 인접 구조물과의 거리를 의미한다. 복잡한 지반을 대상으로 한 발파진동식의 이론적 전개는 아직도 완전히 이루어 지지 않고 있지만 현재까지의 연구결과를 종합하면 발파진동식은 미광무국식(eq. 6, 7)으로 표시할 수 있다. 결정된 발파진동 속도식에서 감쇠지수와 발파진동 상수를 구하기 위해서는 임의로 거리를 변화시키고 장약량도 달리하면서 발파를 실시하여 진동치를 측정된 자료를 가지고 회귀분

석으로 Site의 지질 및 암반성질 등에 따라 좌우되는 발파상수인 K, n값을 결정한다.

주관성을 배제하고 적합한 곡선을 긋기 위한 기준을 설정하기 위하여 데이터 점들과곡선 사이의 차이를 최소화시키는 곡선을 유도하기 위한 최적의 방법은 최소 제곱회귀분석이다. 측정된 데이터에 로그를 취한 후 식 (eq. 8)와 식 (eq. 9)에 데이터를 대입하여 일차직선의 기울기와 진동속도축 절편에 해당하는 상수값을 결정할 수 있다.

$$\alpha_1 = \frac{n \sum PPV_i SRSD_i (CRSD)_i - \sum PPV_i \sum SRSD_i (CRSD)_i}{n \sum PPV_i^2 - (\sum PPV_i)^2} \quad (\text{eq. 8})$$

$$\alpha_2 = \overline{PPV} - \alpha_1 \overline{SRSD(CRSD)} \quad (\text{eq. 9})$$

여기서, n = 총데이터 수, SRSD = (D / W^{1/2}), CRSD = (D / W^{1/3}), $\overline{SRSD(CRSD)}$ = 평균 SRSD(CRSD)(scal distance), PPV = 최대 진동속도(cm/sec), \overline{PPV} = 평균 최대 진동속도(cm/sec)이다. 식 (eq. 8)의 α_1 과 (eq. 9)의

α_2 를 이용하여 회귀분석 직선방정식을 구하면 다음 식 (eq. 10)과 같다.

$$\log(PPV) = \alpha_1 \log(SRSD/CRSD) + \alpha_2 \quad (\text{eq. 10})$$

따라서, 절편 $\log K = \alpha_2$ 와 같으므로 역로그(anti-logarithm)를 취하면 이며, 다음 식 (eq. 11)과 같은 멱방정식(진동추정식(예측식))으로 정리 할 수 있다.

$$PPV = 10^{\alpha_2} \times (SRSD/CRSD)^{\alpha_1} = K \times (SRSD/CRSD)^n \quad (\text{eq. 11})$$

K, n값을 결정하기 위하여 Minitab ver 18.0 통계프로그램을 이용하여 1차 선형관계의 신뢰성 분석은 95% 신뢰구간(CI: Confidence Interval)과 95% 예측구간(PI: Prediction Interval)에 따른 회귀분석을 실시하였으며, 진동관계식은 SRSD와 CRSD을 이용한 회귀분석 결과식 (eq. 12)과 식 (eq. 13)로 산정되었다(Figure 4 참고). SRSD에서 K값을 결정하기 위하여 $K_{50\%}$ 는 $10^{2.365}$ 로서 231.739로 산출되었으며, 표준오차와 R-Program에서 산출된 t-분포(n-1(153), 확률(0.05)) 산출값 1.6549를 고려하여 최종적인 $K_{95\%}$ 값은 $231.739 \times 10^{0.248985 \times 1.6549} = 598.47398$ 로 산정되고, n값은 -1.816으로 최종적인 발파진동 예측식(추정식)은 식 (eq. 14)로 표현된다.

CRSD에서 K값을 결정하기 위하여 $K_{50\%}$ 는 $10^{2.515}$ 로

서 327.341로 산출되었으며, 표준오차와 R-Program에서 산출된 t-분포(n-1(153), 확률(0.05)) 산출값 1.6549를 고려하여 최종적인 $K_{95\%}$ 값은 $327.341 \times 10^{0.238130 \times 1.6549} = 811.11295$ 로 산정되고, n값은 -1.947로 최종적인 발파진동 예측식(추정식)은 식 (eq. 15)로 분석되었다.

$$\log(PPV) = 2.365 - 1.816 \log(SRSD) \quad (\text{eq. 12})$$

$$\log(PPV) = 2.515 - 1.947 \log(CRSD) \quad (\text{eq. 13})$$

$$PPV_{95\%} = 598.47 \cdot \left(\frac{D}{W^{1/2}}\right)^{-1.816} \quad (\text{eq. 14})$$

$$PPV_{95\%} = 811.11 \cdot \left(\frac{D}{W^{1/3}}\right)^{-1.947} \quad (\text{eq. 15})$$

Figure 4 및 Table 5에서 종속변수($\log(SRSD)/\log(CRSD)$)와 반응변수($\log(PPV)$)를 대상으로 95% 신뢰구간(CI : Confidence Interval)과 95% 예측구간(PI : Prediction Interval)을 나타내는 적합회귀선, 표준오차(Standard Error), 결정계수(R^2 : coefficient of determination), 피어슨 상관계수(Pearson correlation coefficient), 회귀모형의 적합성 평가(분산분석(ANOVA - F-검정), 유의성검정(유의확률(p-value)) 등을 제시하였다.

Table 5의 결과로부터 SRSD·CRSD의 경우, 결정계수(R^2) 77.21%(79.15%), 수정결정계수(adjust R^2) 77.06%(79.02%), 피어슨상관계수(Pearson correlation coefficient)

Table 5. Regression and ANOVA analysis in Blasting data (Vibration)

Regression equation	R^2	Adjust R^2	PCC	F	p-value
$\log(PPV) = 2.365 - 1.816 \log(SRSD)$	77.21%	77.06%	87.9%	514.96	0.000
$\log(PPV) = 2.515 - 1.947 \log(CRSD)$	79.15%	79.02%	89.0%	577.15	0.000

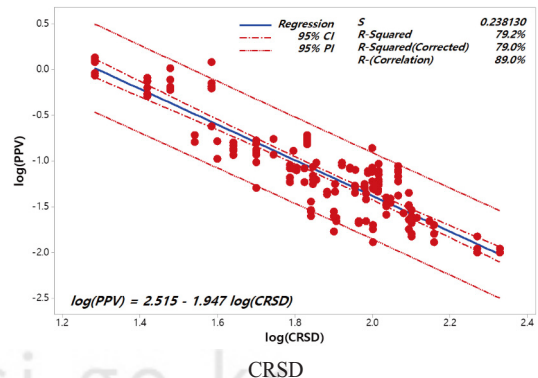
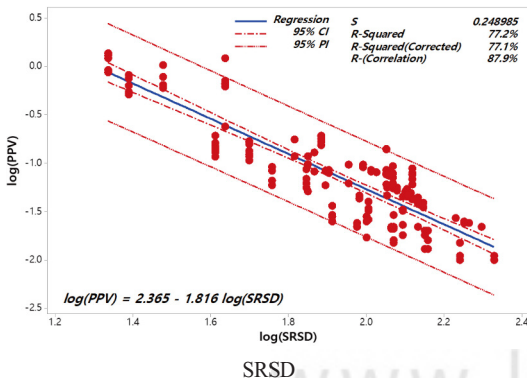


Figure 4. The fitted line plot of the $\log(PPV)$ vs. $\log(SRSD/CRSD)$ through the regression analysis in test blasting (Vibration)

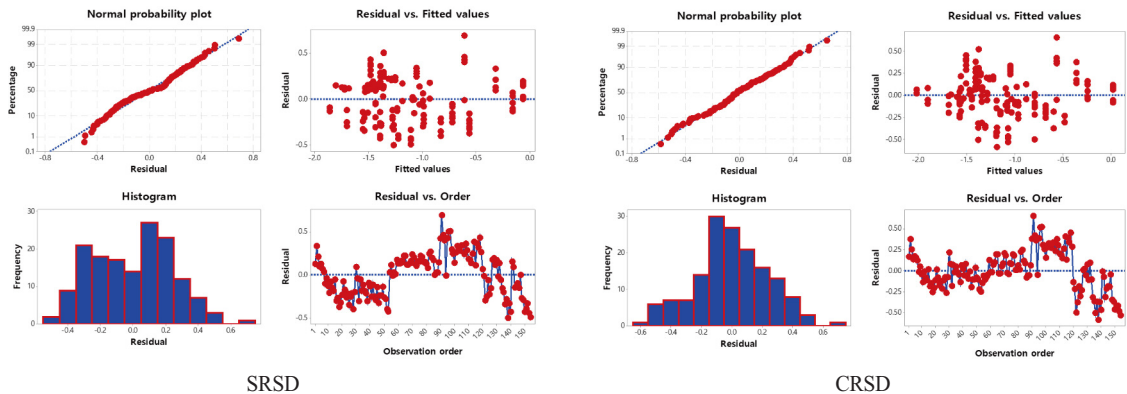


Figure 5. Normal probability plot & the residual plot vs. the fitted value in $\log(PPV)$ vs. $\log(SRSD/CRSD)$ by the test blasting (Vibroation)

87.9%(89.0%) 및 F-검정 결과 높은 선형 회귀식 모형을 나타내며, 회귀계수의 유의성 검정 p-value가 유의수준 (α) 0.05보다 적어 귀무가설(H_0) 기각하여 통계적으로 유의하였다. 이 때 검정통계량은 회귀모형으로서의 가설 설정단계에서 의사결정 절차의 신뢰수준을 파악하는 도구로 사용되기 때문에 F-검정, 결정계수(R^2), 피어슨 상관계수(Pearson Correlation Coefficient; PCC)를 이용하여 좀 더 구체적으로 평가한 결과를 제시하였다.

Figure 5에서 잔차분석(종속변수 Y와 회귀모형의 적합값{Y}의 차이를 잔차라 함)은 회귀모형의 적합성을 진단하는 방법으로서 정규확률도의 경우 잔차가 근사적으로 직선 형태를 띠므로 정규분포를 따른다고 판단되어 회귀모형이 적절하게 수립되었음을 알 수 있다. 또한, SRSD와 CRSD의 정규확률도와 히스토그램 비교 시 CRSD의 회귀모형이 더 적절하게 수립되었음을 알 수 있다.

잔차의 범위가 0.5~-0.5의 분포를 보이므로 데이터 오차의 분포가 일정하다고 볼 수 있으며, 타점된 잔차들이 유사성을 보이지 않고 불규칙적으로 타점이 되어 서로 독립적이라 할 수 있다. 따라서, 진동의 수준을 예측하는 문제는 적합성(상관성)이 얼마나 높은지의 문제라 할 수 있으므로 CRSD의 회귀모형이 SRSD 회귀모형을 사용하는 것보다는 적절한 것으로 판단되나, 두가지 모형 중 어느것을 사용해도 무방한 것으로 판단된다.

3. 발파소음도 예측식 개발

발파소음 데이터의 경우, 발파지점의 지형 및 건물 형태(반사음의 영향 등), 온도, 풍속과 풍향 등의 기상 조건 등도 큰 요인으로 작용하기 때문에 예측식 추정에 상당한 어려움이 있으며, 현장에서 발파 계측 후 발파소음 추정식에 대한 통계분석 수행 시 낮은 상관성(SRSD와 CRSD)으로 인하여 발파소음 추정식(예측식)은 제시를 하지 않는 경우가 대부분이다.

Figure 6 및 Table 6에서 종속변수($\log(SRSD)/\log(CRSD)$)와 반응변수($\log(dB(A))$)를 대상으로 95% 신뢰구간(CI : Confidence Interval)과 95% 예측구간(PI : Prediction Interval)을 나타내는 적합회귀선, 표준오차(Standard Error), 결정계수(R^2 : coefficient of determination), 피어슨 상관계수(Pearson correlation coefficient), 회귀모형의 적합성 평가(분산분석(ANOVA - F-검정), 유의성검정(유의확률(p-value)) 등을 제시하였다.

Table 6의 결과로부터 회귀계수의 유의성 검정 p-value가 유의수준(α) 0.05보다 적어 귀무가설(H_0) 기각하여 통계적으로 유의하였으나, 결정계수(R^2) 35.73%(36.13%), 수정결정계수(adjust R^2) 35.31%(35.71%), 피어슨 상관계수(Pearson correlation coefficient) 59.7%(60.1%) 및 F-검정 결과 적합성이 너무 낮은 선형 회귀식 모형을 나타내는 것으로 분석되어 예측모형으로 사용하기에는 적합하지 않은 것으로 분석되었다.

발파소음 추정식(예측식) 개발을 위한 미광무국식의 SRSD와 CRSD의 모형식은 사용하기에 부적합 것

Table 6. Regression and ANOVA analysis in Blasting data (noise)

Regression equation	R ²	Adjust R ²	PCC	F	p-value
$\log(dB(A)) = 2.089 - 0.1458 \log(SRSD)$	35.73%	35.31%	59.7%	84.50	0.000
$\log(dB(A)) = 2.099 - 0.1553 \log(CRSD)$	36.13%	35.71%	60.1%	85.98	0.000

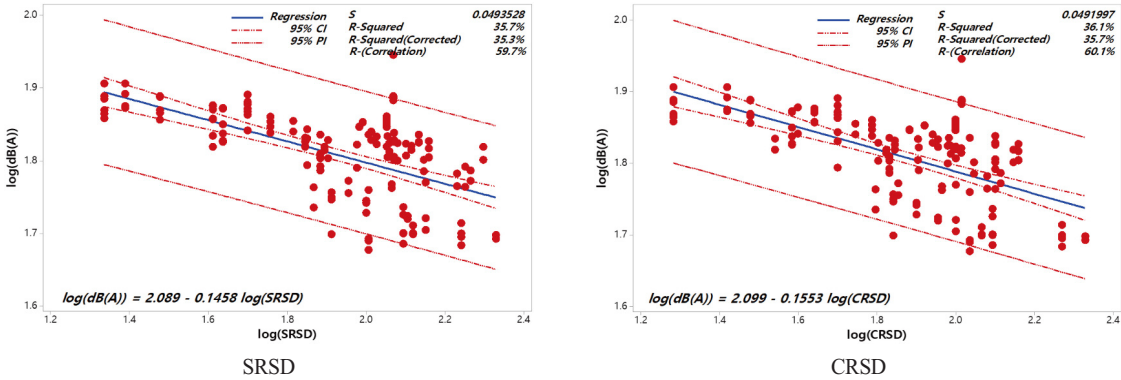


Figure 6. The fitted line plot of the log(dB(A)) vs. log(SRSD/CRSD) through the regression analysis in test blasting (Noise)

로 분석되었으므로 반응변수(dB(A))와 계량형 예측 변수(지발당 장약량(kg)), 범주형 예측 변수(이격거리 (m))를 대상으로 95% 신뢰구간(CI: Confidence Interval) 과 95% 예측구간(PI: Prediction Interval)을 나타내는

단계적 회귀분석을 수행하였다.

Table 7의 결과로부터 회귀계수의 유의성 검정 p-value가 유의수준(α) 0.05보다 적어 귀무가설(H₀) 기각 하여 통계적으로 유의하였으며, 결정계수(R²) 83.05%,

Table 7. Regression and ANOVA analysis in Blasting data (noise)

Distance	Regression equation	R ²	Adjust R ²	PCC	T-value	p-value
15m	$dB(A) = 70.70 + 10.40 \times (\text{Weight per charge (kg)})$	83.05%	80.65%	91.1%	42.47	0.000
25m	$dB(A) = 65.97 + 10.40 \times (\text{Weight per charge (kg)})$					
30m	$dB(A) = 63.93 + 10.40 \times (\text{Weight per charge (kg)})$					
40m	$dB(A) = 64.70 + 10.40 \times (\text{Weight per charge (kg)})$					
45m	$dB(A) = 52.89 + 10.40 \times (\text{Weight per charge (kg)})$					
48m	$dB(A) = 65.29 + 10.40 \times (\text{Weight per charge (kg)})$					
50m	$dB(A) = 56.59 + 10.40 \times (\text{Weight per charge (kg)})$					
53m	$dB(A) = 58.94 + 10.40 \times (\text{Weight per charge (kg)})$					
58m	$dB(A) = 57.90 + 10.40 \times (\text{Weight per charge (kg)})$					
60m	$dB(A) = 62.58 + 10.40 \times (\text{Weight per charge (kg)})$					
63m	$dB(A) = 61.95 + 10.40 \times (\text{Weight per charge (kg)})$					
65m	$dB(A) = 61.82 + 10.40 \times (\text{Weight per charge (kg)})$					
70m	$dB(A) = 58.25 + 10.40 \times (\text{Weight per charge (kg)})$					
78m	$dB(A) = 65.51 + 10.40 \times (\text{Weight per charge (kg)})$					
81m	$dB(A) = 73.88 + 10.40 \times (\text{Weight per charge (kg)})$					
91m	$dB(A) = 45.28 + 10.40 \times (\text{Weight per charge (kg)})$					
124m	$dB(A) = 39.84 + 10.40 \times (\text{Weight per charge (kg)})$					
144m	$dB(A) = 52.35 + 10.40 \times (\text{Weight per charge (kg)})$					
213m	$dB(A) = 35.97 + 10.40 \times (\text{Weight per charge (kg)})$					

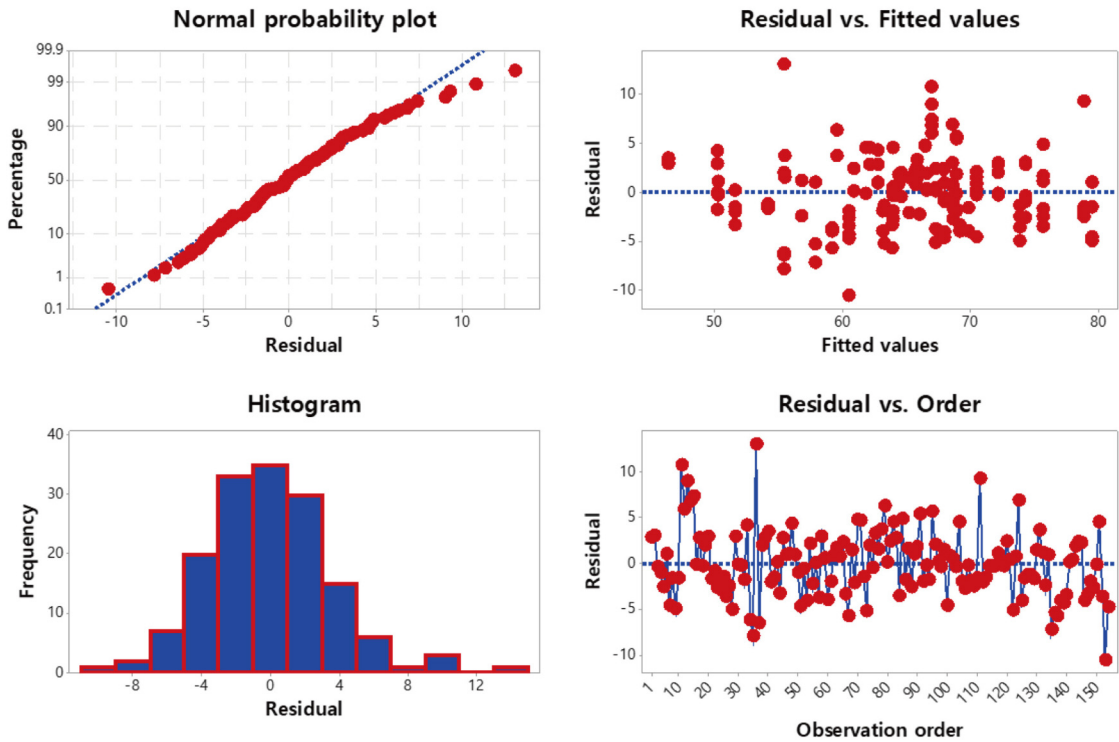


Figure 7. Normal probability plot & the residual plot vs. the fitted value in dB(A) vs. weight per charge, distance by the test blasting (Noise)

Table 8. Regression and ANOVA analysis in constant value determination

Regression equation	R^2	Adjust R^2	PCC	F	p-value
$Y = 69.59 - 0.1818 (\text{Distance (m)})$	77.54%	75.94%	88.1%	48.33	0.000

수정결정계수(adjust R^2) 80.65%, 피어슨 상관계수(Pearson correlation coefficient) 91.1% 및 T-값 결과 적합성이 높은 선형 회귀식 모형을 나타내는 것으로 분석되어 예측모형으로 사용하기에는 적합한 것으로 분석되었다.

Figure 7에서 단계적 회귀분석에 대한 잔차 분석결과, 정규확률도의 경우 잔차가 근사적으로 직선 형태를 띠므로 정규분포를 따른다고 판단되어 회귀모형이 적절하게 수립되었음을 알 수 있으며, 잔차의 범위가 10.0~ -10.0의 분포를 보이므로 데이터 오차의 분포가 일정하다고 볼 수 있으며, 타점된 잔차들이 유사성을 보이지 않고 불규칙적으로 타점이 되어 서로 독립적이라 할 수 있으며, 발파소음 추정식(예측식)으로 사용이 가능한 것으로 판단된다.

Table 7에서의 회귀방정식을 실무적으로 적용하기에는 이격거리별 회귀방정식이 여러개로서 한계가 있는 것으로 판단되어 한 개의 발파소음 추정식(예측식)

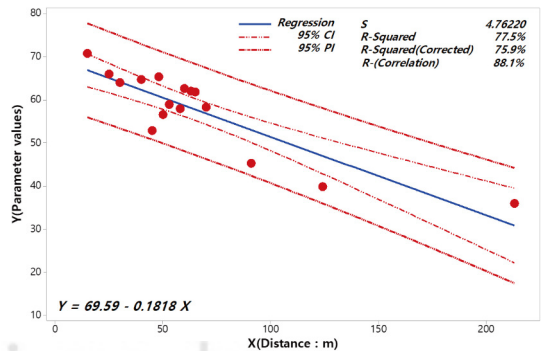


Figure 8. The fitted line plot of the constant vs. distance(m) through the regression analysis

을 개발하기 위하여 종속변수(이격거리(m))와 반응변수(회귀방정식(Regression equation)의 상수값(계수값))를 대상으로 회귀모형의 적합성 평가(분산분석(ANOVA - F-검정) 분석을 수행하였으며, 분석결과, 결정계수(R^2) 77.54%, 수정결정계수(adjust R^2) 75.94%, 피어슨 상관계수(Pearson correlation coefficient) 88.1% 및 F-검정 결과 적합성이 높은 선형 회귀식 모형(계수값 결정)으로 분석되었다. 따라서, 발파소음 추정식(예측식)을 제시하면 식 (eq. 16)로 표현된다.

$$dB(A) = (69.59 - 0.1818 \times (Distance (m)) + 10.40 \times (Weigh per charge (kg))) \quad (\text{eq. 16})$$

V. 고찰

본 연구에서는 교육환경평가 및 환경영향평가서 소음·진동 분야 작성 시 도시지역 발파 시 전제조건에 따른 소음·진동 예측식 개발을 통하여 신뢰성 있는 소음·진동도를 추정하여 목표기준을 만족하기 위한 지발당 장약량 산정 및 저감방안 수립에 활용하고자 발파소음·진동 추정식(예측식)을 제안하였다는 점에서 본 연구의 차별성이 있으며, 이 연구의 결과를 정리하면 다음과 같다.

1. 발파소음·진동 추정식(예측식)은 경험식으로 암질은 연암~보통암, 발파원으로부터의 이격거리 15~213m, 기폭공수 2~4공, 폭약의 종류는 New Mite Plus ($\phi 32\text{mm}$)~New Emulite ($\phi 32\text{mm}$), 도시지역의 특성을 고려하여 방호매트를 설치 후 발파패턴에 따라 미진동·정밀진동·소규모진동제어발파를 수행했을 경우의 전제조건에서 신뢰성을 나타내는 발파소음·진동 예측식을 제안하여 환경영향평가와 교육환경평가 소음·진동분야 보고서 작성 시 이격거리별 지발당 장약량에 따른 최대 진동속도(Kine)와 최대 소음도(Peak치; dB(A)) 산출이 가능할 것으로 사료된다.

2. 발파진동 추정식(예측식)의 SRSD 및 CRSD에 의한 피어슨 상관계수(Pearson correlation coefficient)는 0.879, 0.890으로 차이가 없고, $R^2 \geq 0.7$ 로 나타나 발파설계 및 교육환경평가 및 환경영향평가 발파진동 추정식(예측식)에 적용하여도 무방하다고 판단되었다.

3. 발파소음 추정식(예측식)의 SRSD 및 CRSD에 의

한 피어슨 상관계수(Pearson correlation coefficient)는 0.597, 0.601로 차이가 없고, $R^2 \leq 0.7$ 로 나타났으며, 상관성이 낮은 이유로는 발파지점 주변지역의 지형 및 건물형태(반사음의 영향 등), 온도, 풍속과 풍향 등의 기상조건 등으로 인하여 예측식의 상관성이 낮은 것으로 추정되어 SRSD 및 CRSD에 의한 발파소음 추정식(예측식) 사용은 부적절 한 것으로 사료된다.

4. 반응변수($\log(dB(A))$)와 계량형 예측 변수(지발당 장약량(kg)), 범주형 예측 변수(이격거리(m))를 대상으로 단계적 회귀분석을 수행한 결과 피어슨 상관계수(Pearson correlation coefficient)가 0.911로 높고 $R^2 \geq 0.7$ 로 나타나 발파설계 및 교육환경평가 및 환경영향평가 발파진동 추정식(예측식)에 적용이 가능한 것으로 판단되었다.

5. 단계적 회귀분석을 수행한 결과 여러개의 예측식을 하나로 통일하기 위하여 계수(상수)값을 결정하기 위한 종속변수(이격거리(m))와 반응변수(회귀방정식(Regression equation)의 상수값(계수값))를 대상으로 회귀분석을 수행한 결과, 피어슨 상관계수(Pearson correlation coefficient) 0.881로 높으며, $R^2 \geq 0.7$ 로 나타나 발파설계 및 교육환경평가 및 환경영향평가 발파소음 추정식(예측식)에 적용하는 것이 가능하다고 판단 되었다.

VI. 결론

환경영향평가나 교육환경평가 소음·진동분야 작성 시 국토교통부의 암발파 설계 및 시험발파지침에서 제시하고 있는 발파진동 예측식을 적용하여 평가를 수행하고 있으나 본 지침의 예측식 적용기준은 고속국도, 일반국도 및 국가지원 지방도 건설공사구간 중 노천에서 시행하는 암발파 설계 및 시공에 적용하는 예측식으로 도시지역 재건축사업이나 공동주택 건설에 따른 발진동을 예측하기에는 한계가 있다. 발파소음은 미광무국(USBM) 실험식을 적용하여 발파현장에서 음압 Peak치인 dB(L) 측정치로부터 음압레벨($=20 \log(P/P_0)$)을 적용하여 예측을 수행하고 있으나, 노천발파와는 다르게 도시지역 특성상 방호매트를 설치 후 시험발파를 수행하므로 정확한 음압을 발파소음 예측식에 적용

하기에는 한계가 있으므로 인체 감응도에 부합하는 소음레벨 dB(A) 예측식 개발이 필요한 실정이다.

따라서, 본 연구는 도시지역 발파작업에 따른 정온을 요하는 시설로부터 이격거리별 지발당 장약량을 산정하기 위하여 인천, 수원, 원주, 양산 지역에서 취득한 320개의 데이터를 사용하여 적용가능한 예측식을 개발하였다. 개발된 예측식은 다른 도시지역의 재건축사업이나 공동주택 건설에 따른 환경영향평가나 교육환경평가서 소음·진동분야 보고서 작성 시 정합성이 높은 발파소음·진동 예측값 도출이 가능한 것으로 연구 결과 및 고찰에 제시되었다.

본 연구의 한계점으로 발파소음·진동 예측식은 경험식으로서 발파진동의 경우 지반 아래 암질의 형태(연암~보통암)가 변하는 경암(Hard Rock)일 경우와 전제조건(암질상태, 이격거리, 기폭공수, 폭약종류, 방호매트 설치여부 등)에 부합하지 않을 경우에 본 발파진동 예측식 적용하기에는 무리가 있으며, 발파소음의 경우, 인체 감응도에 부합하는 소음레벨 dB(A)로 변환하여 적용가능한 예측식을 개발하였으나, 발파소음도 측정 당시의 주변 환경적인 특성과 기상학적인 요소에 민감한 특징을 전부 반영한 것은 아니므로 향후에 다양한 지역에서 계절별 주변의 환경적인 특성을 반영한 예측식 개발이 필요하다.

사사

본 결과물은 한국교육환경보호원 재원으로 교육환경평가 환경현안대응 기술지원 컨설팅 사업의 지원을 받아 연구되었습니다(2023 TR-06).

References

- Ambraseys NR, Hendron AJ. 1968. Dynamic Behavior of Rock Masses, *Rock Mechanics in Engineering Practice* (K.G. Stagg and O.C. Zienkiewicz, eds.), John Wiley & Sons, Inc., London, pp. 203-227.
- Attewell PB, Farmer IW, Haslam D. 1965. Prediction of Ground Vibration Parameters from Major Quarry Blasts. *Mining and Minerals Engineering*, Dec., pp. 621-626.
- Choi BH, Ryu CH. 2015. Measurements and Data Processing for Blast Vibrations and Air-blasts. *Journal of Korean Society of Explosives & Blasting Engineering*, 33(3): 29-50. [Korean Literature]
- Davies B, Farmer IW, Attewell PB. 1964. Ground Vibration from Shallow Subsurface Blasts. *The Engineer*, Mar. 7, pp. 553-559.
- Devine JE. 1962. Vibration Levels from Multiple Holes per Delay Quarry Blasts. *Earthquake Notes*, XXXIII: 32-39.
- Devine JE, Duvall WI. 1963. Effect of Charge Weight on vibration Levels for Millisecond Delayed Quarry blasts. *Earthquake Notes*, XXXIV: 17-24.
- Diacio SB. 2014. Effects of noise pollution in the learning environment on cognitive performances. *Liceo Journal of Higher Education Research*, 10(1): 83.
- Dowding CH. 1971. Response of Buildings to Ground Vibrations Resulting from Construction Blasting. Ph.D. Thesis, Univ. of Illinois at Urbana Champaign, p. 204.
- Duvall WI, Petkof B. 1959. Spherical Propagation of Explosion-Generated Strain Pulses in Rock, *USBMRI 5483*, pp. 1-20.
- Ghosh A, Daemen JJK. 1983. A Simple New Vibration Predictor (Based on Wave Propagation Laws). 24th US Symp. on Rock Mech., Texas, pp. 151-157.
- Gustafsson R. 1973. *Swedish Blasting Technique*. SPI, Gothenburg, Sweden, pp. 211-221.
- Habberjam JM, Whetton JT. 1952. On the Relation between Seismic Amplitude and Charge of Explosive Fired in Routine Blasting Operation. *Geophysics* 17(1): 116-128.
- Lee NH, Park KH, Kim JI, Kim HW, Kwon JW. 2023. A Study on the Development for Prediction

- Model of Blasting Noise and Vibration during Construction in Urban Area. Proceedings of the KSNVE Annual Autumn Conference, p. 246. [Korean Literature]
- Morris G. 1950. Vibrations due to Blasting and Their Effects on Building Structure. The Engineer, London, pp. 394-395.
- Nicholls HR, Johnson CF, Duvall WI. 1971. Blasting Vibrations and Their Effects on Structures. USBM Bulletin 656, p. 105.
- Pal RP. 1991. Prediction and Control of Ground Vibrations due to Blasting. Colliery Gaurdian 239(7): 215-210.
- Park YS, Park SJ, Choi SM, Mun SB, Mun BO, Jeong GY, Jeong TH, Hwang SI, Kim MJ, Park SC, Kim JJ, Lee BG. 2009. Vibration Prediction and Charge Estimation in Hard Rock Blasting Site. Korean Society for Noise and Vibration Engineering, 19(3): 313-319. [Korean Literature]
- Shield BM, Dockrell JE. 2008. The effects of environmental and classroom noise on the academic attainments of primary school children. The Journal of the Acoustical Society of America, 123(1): 133-144.
- Siskind DE. 2000. Vibrations from Blasting. ISEE, Cleveland, OH USA, pp. 14-15, 17-28.
- Siskind DE, Stagg MS, Kipp JW, Dowding CH. 1980a. Structure Response and Damage Produced by Ground Vibration from Surface Mine Blasting. USBM RI 8507, pp. 9-17.
- Siskind DE, Stachura VJ, Stagg MS, Kopp JW. 1980b. Structure Response and Damage Produced by Airblast From Surface Mining. USBM RI 8485, p. 111.
- Snodgrass JJ, Siskind DE. 1974. Vibrations from Underground Blasting. USBM RI 7937, p. 31.