

굴착기의 음향파워레벨 회귀분석

Regression Analysis of an Excavator Sound Power Level

구진회†·이재원*·서충열*·장성기**·최경희**·한진석**

Jinhoi Gu, Jaewon Lee, Chungyoul Seo, Seongki Jang, Kyunghye Choi and Jinseok Han

(2010년 8월 3일 접수 ; 2012년 2월 3일 심사완료)

Key Words : Regression Analysis(회귀분석), Sound Power Level(음향파워레벨), Excavator(굴착기)

ABSTRACT

The noise emitted from an excavator has long been a cause of environmental disputes, while causing displeasure to the nearby residents. So, the ministry of environment adopted the construction machinery noise labeling system to encourage the construction machinery manufacturing companies to develop the low noise construction machinery voluntarily. But, as the quality of life improves, a growing number of people desire the comfortable and quite environment to live in. Under the situation, noise from the construction machinery has been a major cause for stress and complaints. When the noise dispute happened in the construction site, the sound pressure level of the construction machinery like a excavator was measured at the lot boundary of the noise victim's residence to judge how much noise damage occur. But the sound pressure level of the construction machinery is measured differently according to the acoustic environment of construction site and the measuring position, respectively, which makes it difficulty to judge whether the noise damage occur or not. As the sound power level of noise source is not affected by the acoustic environment of construction site and the measuring position, if we use the information of the sound power level, it will be easy to judge whether the noise damage occur and to establish the soundproofing measures. Therefore, we derive the sound power level regression model of the excavator to judge whether the noise emitted from the excavator damages to residents near the construction site. Also, the sound power level regression model of the excavator drawn in this paper will help construction companies to plan the noise reduction program in the construction sites.

1. 서론

공사장에서 굴착 작업 등에 사용되는 굴착기는

고소음을 발생하는 중장비로 지속적인 환경 분쟁 및 민원의 주 대상이었다⁽¹⁾. 이에 따라 환경부에서는 2008년부터 굴착기 등 고소음 발생 건설기계류에 대해 걸면에 음향파워레벨을 표시하도록 하는 소음표시제도를 도입하여 기업체의 자발적인 저소음 건설기계 개발을 유도하고 있다. 그럼에도 불구하고 쾌적하고 정온한 삶의 질을 추구하는 현대인들에게 거주지 인근 공사장에서 발생하는 굴착기 소음은 스트레스의 주요인이며 공사장에서의 소음 민원은 지속적으로 제기되는 실정이다.

굴착기와 같은 건설기계 소음은 소음분쟁 발생

† 교신저자; 정희원, 국립환경과학원

E-mail : gujhgujh@korea.kr

Tel : (032)560-8323

* 정희원, 국립환경과학원

** 국립환경과학원

이 논문의 일부는 2010년 춘계 소음진동 학술대회에서 발표되었음.

시 피해자 부지경계선에서 음압레벨을 측정하고 평가소음도의 기준초과 여부를 조사하여 소음방지대책의 필요 여부를 판단한다. 하지만 음압레벨(dBA)은 소음원과 수음점간의 거리에 따라 다르게 측정이 되고, 소음이 전달되는 음장 환경 및 배경소음 등에 따라 소음 크기가 다르게 측정되는 등 측정 환경 및 조건에 따른 불확실성이 커서 음압레벨만 가지고 정확한 소음방지대책 필요 여부를 판단하기가 매우 어려웠다. 하지만 소음원으로부터 떨어진 거리나 주변 음장환경 등에 영향을 받지 않고 굴착기 고유의 값을 갖는 음향파위레벨값 정보를 이용하면 공사장 민원 발생 시 소음 발생 정도를 판단하고 소음방지대책을 수립하는데 유용할 것이다. 따라서, 이 연구에서는 굴착기의 제원 및 측정환경 정보를 토대로 굴착기의 음향파위레벨을 예측할 수 있는 굴착기 음향파위레벨 회귀모델을 도출하여 향후 공사장 굴착기 소음 민원 발생에 따른 피해여부 판단 및 방지대책 수립에 활용하고자 한다.

2. 굴착기 음향파위레벨 산정

2.1 굴착기 음압레벨 측정

굴착기 음압레벨 측정은 소음 발생 건설기계 소음도 검사 방법(환경부고시 제2009-222호) 및 음향-음압법에 의한 소음원의 음향파위레벨 측정방법-반사면상 준자유 음장에서 실용측정방법(KS A ISO 3744:2002)⁽²⁾에 준하여 Fig. 1과 같이 측정하였다.

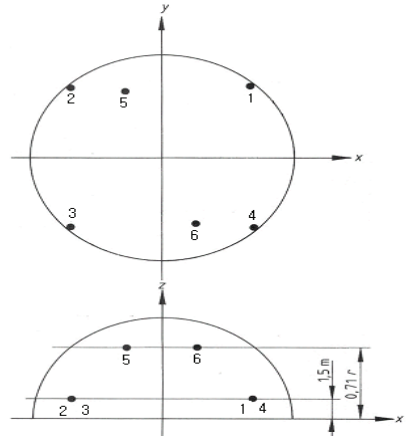
여기서 측정면의 반경 r 은 KS A ISO 3744의 규격에 따라 음원(굴착기) 치수의 2배 이상으로 했으며, 세부 측정 반경 r 은 소음발생 건설기계 소음도 검사방법에 따라 아래와 같이 선정했다. Fig. 2는 굴착기의 기본 길이(l)를 나타낸다.

- $l < 1.5 \text{ m}$ $r = 4 \text{ m}$
- $1.5 \text{ m} \leq l < 4 \text{ m}$ $r = 10 \text{ m}$
- $4 \text{ m} \leq l$ $r = 16 \text{ m}$

2.2 굴착기 음향파위레벨 산정 및 현황

굴착기의 음향파위레벨은 음향-음압법에 의한 소음원의 음향파위레벨 측정방법-반사면상 준자유 음장에서 실용측정방법(KS A ISO 3744:2002)⁽²⁾에 따라 측정된 6지점의 시간 평균 음압레벨(time-averaged sound pressure level, $L_{eq,1}$)을 이용하여

식 (1)과 같이 굴착기 평균 음압레벨을 구한 후 식 (2)와 같이 배경소음 보정 및 환경보정을 하여 대상



Number of microphone	x/r	y/r	z
1	0.7	0.7	1.5 m
2	-0.7	0.7	1.5 m
3	-0.7	-0.7	1.5 m
4	0.7	-0.7	1.5 m
5	-0.27	0.65	0.71 r
6	0.27	-0.65	0.71 r

Fig. 1 Microphone positions on the semi-sphere to measure the time-averaged sound pressure level of the excavator

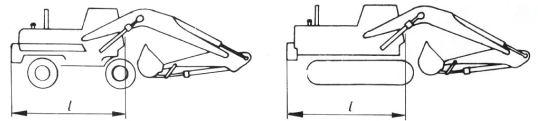


Fig. 2 Standard length of the excavator

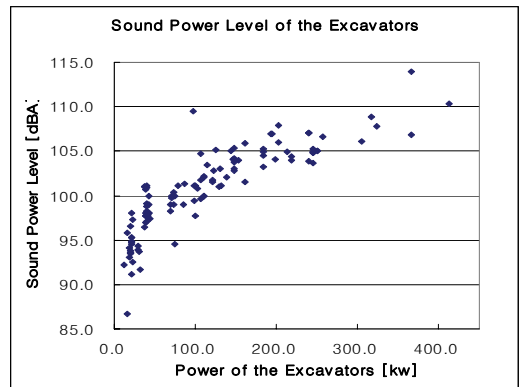


Fig. 3 Sound power level of each excavator

굴착기의 음향파위레벨을 계산했다.

$$L_{eq} = 10 \log \left(\frac{1}{6} (10^{(0.1 \times L_{eq.1})} + \dots + 10^{(0.1 \times L_{eq.6})}) \right) \quad (1)$$

$$L_W = L_{eq} - K_1 - K_2 + 10 \log(S/S_0) \quad (2)$$

여기서, $L_{eq,n}$: n 지점의 시간 평균 음압레벨

L_{eq} : 평균 음압레벨

L_W : 음향파위레벨

K_1 : 배경소음 보정치

K_2 : 환경 보정치

S : 측정면의 면적(m^2), $2\pi r^2$

S_0 : 기준면적($1 m^2$)

Fig. 3은 굴착기 엔진출력(kW)에 따른 시험대상 굴착기 118대의 음향파위레벨 분포를 나타낸다. 시험대상 굴착기는 8개 기업체에서 생산된 새 제품이며 엔진출력에 대해 약 85.7%의 상관성을 보였다.

3. 회귀모델의 설계

3.1 회귀모델의 선정

굴착기 음향파위레벨 회귀모델은 총 118대의 굴착기 음향파위레벨 정보를 기반으로 하여 총 3개의 회귀변수(제작사, 엔진출력, 지표면종류)를 검토했으며, 통계분석 프로그램인 SAS를 이용하여 분석했다. 일반적으로 회귀모델의 적절성에 대한 평가 지표로 사용되는 R^2 (coefficient of determination)는 모델에 사용되는 회귀변수(regressor) 개수가 증가할수록 R^2 값도 증가하는 특징이 있어 R^2 만으로 회귀모델의 적절성 평가가 어려운 점을 고려하여 회귀모델 선정에 대한 적절성 평가는 adjusted R^2 를⁽³⁾ 활용하였다. 먼저 회귀모델은 식(3), (4)와 같이 linear model과 nonlinear model을 설계하여 adjusted R^2 값이 큰 모델을 우수한 이 연구의 회귀모델로 선정했다⁽⁴⁾.

Linear model :

$$y = b_0 + b_1x_1 + b_2x_2 + b_3x_3 \quad (3)$$

Nonlinear model :

$$y = b_0 + b_1x_1 + b_2 \log(x_2) + b_3x_3 \quad (4)$$

$$\text{Adjusted } R^2 = 1 - (1 - R^2) \left(\frac{n-1}{n-p-1} \right)$$

$$= 1 - \left(\frac{SS_{err}}{SS_{tot}} \right) \left(\frac{n-1}{n-p-1} \right) \\ = 1 - \frac{SS_{err}}{SS_{tot}} \frac{df_t}{df_e}$$

y : 음향파위레벨

b_0, b_1, b_2, b_3 : 각각 intercept 및 제작사, 엔진출력, 지표면 종류(아스팔트, 콘크리트 등)

x_1, x_2, x_3 : 각각 제작사, 엔진출력, 지표면 종류에 대한 관측값으로 x_3 는 아스팔트는 '1', 콘크리트는 '0' 입력

R^2 : 결정계수(coefficient of determination)

SS_{err} : 회귀모델과 음향파위레벨 측정값간의 오차제곱 합

SS_{tot} : 전체 음향파위레벨 측정값의 제곱 합

n : 굴착기 음향파위레벨 측정데이터 개수 (sample size)

p : 회귀변수의 개수(the total number of regressors)

df_t : 굴착기 음향파위레벨 측정데이터의 자유도(n-1)

df_e : 회귀모델 오차값의 자유도(n-p-1)

선형 모델과 비선형 모델의 adjusted R^2 값을 비교한 결과 Table 1과 같이 nonlinear model의 adjusted R^2 값이 0.8200로 linear model의 adjusted R^2 값 0.7795보다 크게 나타났다. 따라서, 엔진출력값을 로그 변환한 비선형 회귀모델(식(4))을 굴착기의 음향파위레벨 회귀모델로 선택하였다. 이는 굴착기의 음향파위레벨이 출력에 대해 비선형적으로 증가하는 Fig. 3의 경향과도 일치한다.

3.2 회귀변수의 선정

이 연구에서 설계한 굴착기 비선형 회귀모델 식(4)는 굴착기 제조회사 및 굴착기 출력, 지표면 정보를 회귀모델의 입력값으로 하는 모델로 각각의 입력 변수들이 비선형 회귀모델 식(4)에서 적절한 변수로

Table 1 The comparison of the adjusted R^2 and R^2 value between the linear model and the nonlinear model

Determinant	Linear model	Nonlinear model
Adjusted R^2	0.7795	0.8200

사용되었는지에 대한 유의성을 평가했다. 도출된 회귀모델 식(4)의 변수(제조사, 출력, 지표면종류)에 대한 유의성은 t-검정값과 partial sum of square 값으로 검토하였다.

먼저 Table 2는 회귀모델 식(4) 변수의 유의성에 대한 t-검정 결과로 x1(제조사)은 t-검정결과 p값이 0.7243으로 높게 나와 무의미한 변수로 나타났고, x2(출력), x3(지표면종류)는 각각 <0.0001, 0.0729로 작게 나와 유의한 변수로 나타났다. 또한 개별 변수가 전체 회귀모델에서 차지하는 비중을 나타내는 partial sum of square 분석에서도 Table 3과 같이 제조사(x1)에 대해서는 0.50126으로 가장 작은 값으로 나타나 전체 회귀모델에서 차지하는 비중이 매우 작은 것으로 나타나 비선형회귀모델의 입력변수에서 제외하였다.

이렇게 하여 도출된 최종 굴착기 음향파워레벨 회귀모델은 아래의 식(5)와 같다.

Excavator regression model(reduced model):

$$y = b_0 + b_2 \log(x_2) + b_3 x_3 \quad (5)$$

Table 2 The t-test result of the variable x1, x2 and x3 which mean the manufacturing firm, the power of the excavator and the kind of the measurement surface.

Variable	Parameter estimate	Standard error	t value	Pr > t
Intercept	82.56204	1.26190	65.43	<0.001
x1	-0.04887	0.13823	-0.35	0.7243
x2	9.81479	0.56233	17.45	<0.001
x3	-1.24580	0.68832	-1.81	0.0729

Table 3 The partial sum of square of the nonlinear model

Variable	Partial sum of square
Intercept	17166.00000
x1	0.50126
x2	1221.59068
x3	13.13609

Table 4 The adjusted R² value of the full model and reduced model

Variable	Full model	Reduced model
Adjusted R ²	0.8200	0.8214

최종 굴착기 음향파워레벨 회귀모델(식(5))은 기존의 full model인 식(4)와 adjusted R²값을 비교했을 때 reduced model인 식(5)의 adjusted R²값이 0.8214로 full model adjusted R²값(0.8200)보다 크게 나타나 (Table 4) 기존의 full model보다 개선된 회귀모델임을 확인했다.

3.3 굴착기 음향파워레벨 회귀모델에 대한 고찰

따라서 이 연구에서 도출한 굴착기 음향파워레벨 회귀모델은 식(6)과 같이 출력(x₁)과 지표면종류(x₂)를 입력변수로 하는 비선형 회귀모델이며 SAS 통계 분석프로그램으로 도출된 회귀변수값(b₀, b₁, b₂)는 Table 5와 같다. 식(6)에서 아스팔트 지표면은 x₂값이 '1', 콘크리트 지표면은 x₂값이 '0'이다.

Excavator regression model:

$$y = b_0 + b_1 \log(x_1) + b_2 x_2 \quad (6)$$

이 연구에서 도출된 회귀모델(6)로 부터 굴착기의 음향파워레벨은 출력에 대해 로그 스케일로 증가하여 출력이 10배 증가할 때 마다 굴착기 음향파워레벨은 9.9 dBA 가량 증가하는 것을 알 수 있으며 콘크리트 지표면에서는 아스팔트 지표면보다 약 1.4 dB(A)가량 크게 측정됨을 알 수 있었다. 아스팔트 지표면보다 콘크리트 지표면에서 음향파워레벨이 크게 측정되는 것은 아스팔트 바닥의 다공질 특성에 의한 흡음효과 때문으로 판단된다.

한편, Fig. 4는 이 연구에서 도출된 굴착기의 음향파워레벨 회귀곡선과 실제 굴착기(118대)의 음향파워레벨을 비교한 그림이다. Fig. 4에서 황축은 굴착기의 출력을 나타내고 종축은 음향파워레벨을 나타낸다. Fig. 4의 상단의 곡선은 콘크리트 지표면에서의 굴착기 음향파워레벨 회귀곡선을 나타내고 하단의 곡선은 아스팔트 바닥에서의 굴착기 음향파워레벨 회귀곡선을 나타낸다. Fig. 4에서 두 회귀곡선의 차이는 1.4 dB로 이는 Table 5에서 아스팔트 지표면과 콘크리트 지표면의 차이에 따른 회귀모델의 차이에 기인한다.

Table 5 The parameter of the excavator regression model

b ₀	b ₁	b ₂
82.37651	9.85070	-1.41399

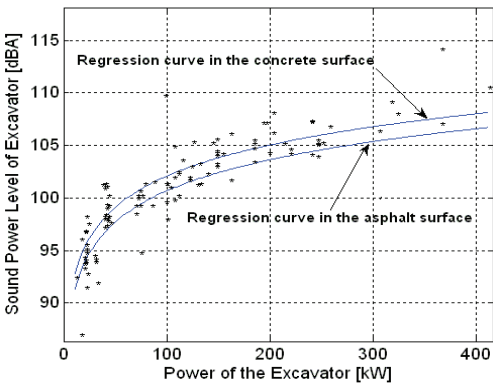


Fig. 4 Regression curve in the concrete surface and asphalt surface

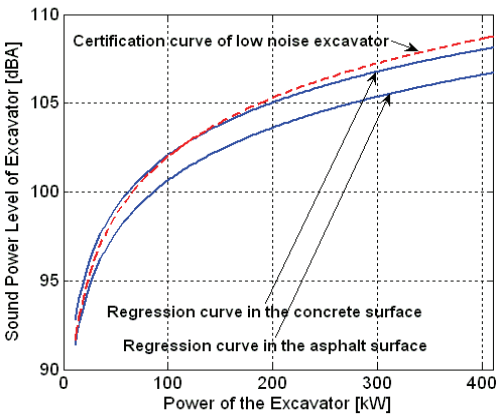


Fig. 5 Comparison of the regression curve and the certification curve of low noise emission for excavator

Fig. 5는 한국환경산업기술원에서 제시한 저소음 건설기계 인증기준⁽⁵⁾의 저소음 굴착기 인증곡선과 이 연구에서 도출된 굴착기 음향파워레벨 회귀곡선을 비교한 그림이다. Fig. 5에서 횡축은 출력을 나타내고 종축은 음향파워레벨을 나타내며, 점선은 한국환경산업기술원의 저소음 굴착기 인증곡선을 나타내고, 실선은 이 연구에서 도출된 아스팔트 지표면 및 콘크리트 지표면에 대한 굴착기 음향파워레벨 회귀곡선을 나타낸다. 굴착기 음향파워레벨 회귀곡선은 출력의 범위에 따라 출력 50 kW 이하에서는 아스팔트 노면 회귀곡선과 한국환경산업기술원의 저소음 굴착기 인증곡선이 가깝게 지나고 출력 120 kW 이

상에서는 콘크리트 노면 회귀곡선과 한국환경산업기술원의 저소음 굴착기 인증곡선이 가깝게 지나간다. 이는 한국환경산업기술원의 저소음 굴착기 인증곡선은 소음 측정 지표면을 아스팔트와 콘크리트로 구분하지 않았기 때문에 이 연구에서 도출된 굴착기 음향파워레벨 회귀곡선 사이(아스팔트 및 콘크리트)를 지나가는 것으로 판단된다. 이 연구에서 도출된 굴착기 음향파워레벨 회귀모델은 예측값과 실측값 간의 상관관계(R^2)가 약 82.4%인 것으로 나타났다.

4. 결 론

굴착기의 음향파워레벨에 대한 회귀모델을 비선형 회귀모델을 이용하여 설계한 결과 제작사, 굴착기 출력, 지표면종류 중 굴착기 출력과 지표면 종류가 유의한 변수인 것으로 나타났으며 굴착기에서 방출되는 음향파워레벨은 출력이 10배 증가함에 따라 9.9dBA 증가하고, 콘크리트 바닥에서는 아스팔트 바닥의 다공질 특성에 의해 아스팔트 바닥보다 약 1.4 dBA 가량 크게 측정되는 것으로 나타났다.

참 고 문 헌

- (1) Sun, H. S., 2009, Study on Effective Noise Management Plan of Construction Site, Transactions of the Korean Society for Noise and Vibration Engineering, Vol. 19, No. 2, pp. 176-183.
- (2) KS A ISO 3744:2002 Acoustics-determination of Sound Power Levels of Noise Sources Using Sound Pressure-engineering Method in an Essentially Free Field Over a Reflecting Plane.
- (3) Theil, Henri, 1961, Economic Forecasts and Policy, Holland, Amsterdam: North.
- (4) Raymond, H. M., 2000, Classical and Modern Regression with Applications, Duxbury Press, Second Edition.
- (5) 2002, Criteria of Low Noise Construction Machinery, Korea Environmental Industry & Technology Institute, EL653, p. 1.