

Development of Railway Vibration Evaluation System Using Actual Railway Vibration Database

Lee Hyunjun[†] · Seo Eun Seong^{††} · Hwang Young Sup^{†††}

ABSTRACT

Recently, it is necessary to develop a technology for quantitatively evaluating railway vibration to prevent civil complaints about orbital structures caused by railway noise and normal operation of ultra-precise equipment of orbital industrial complexes. The existing analytical method requires a very complicated dynamic response model, and it is difficult to secure the reliability of the result due to the inaccuracy of the demand model. Therefore, in this paper, we propose a railway vibration evaluation algorithm and system that deduce the vibration value generated from railway operation by using Linear Regression and Gradient Descent technique based on actual measurement railway vibration database that classifies factors affecting railway vibration. The prediction results obtained by the proposed algorithm show higher efficiency and accuracy than the existing analytical methods.

Keywords : Railway, Vibration&Noise Database, Gradient Descent, Inference System

실측 철도 진동 데이터베이스를 이용한 철도진동 평가 시스템 개발

이 현 준[†] · 서 은 성^{††} · 황 영 섭^{†††}

요 약

최근 철도소음으로 인해 발생하는 궤도 주변 구조물의 민원 방지와 궤도 주변 산업단지의 초정밀 장비들의 정상적인 운영을 위해 철도 진동을 정량적으로 평가할 수 있는 기술개발이 필요하다. 기존의 해석적인 방법은 매우 복잡한 동적 응답 모델이 요구되며, 요구 모델의 부정확성으로 인한 결과의 신뢰성을 확보하기 어려운 문제가 있다. 따라서, 본 논문에서는 철도 진동에 영향을 주는 요소들을 분류한 국내 철도진동 실측 데이터베이스를 기반으로 Linear Regression, Gradient Descent 기법을 이용해 철도 운행으로부터 발생하는 진동값을 추론하는 철도진동 평가 알고리즘 및 시스템을 제안한다. 제안된 알고리즘으로 얻은 추론결과는 기존의 해석적 방법에 비해 높은 효율성과 정확성을 보인다.

키워드 : 철도, 진동소음 데이터베이스, Gradient Descent, 추론시스템

1. 서 론

최근 국민의 정온한 환경에 대한 권리의식 증대와 삶의 질에 대한 높은 관심으로 철도 소음에 대한 민원이 급증하고 있다 [1]. 이는 지역 갈등을 초래하고 막대한 사회적 비용 부담으로 철도 산업을 저해하는 요소이다. 그러나 지금까지는 당면한 소음 문제의 시급한 해결을 위한 일시적인 조치나 대책 마련 정도의 기술을 개발해 왔다. 그 결과 실질적이고 지속적인 소음 저

감 효과가 낮았다. 따라서 국민이 체감할 수 있는 철도 저소음화 기술 개발이 부족한 실정이다. 또한, 대부분의 민원은 철도 운행으로 인해 발생하는 진동에 의한 구조소음에 기인하는 경우가 대부분이므로 이에 대한 연구도 필수적이다[1].

이에 따라, 민·관을 중심으로 철도진동 소음원 분석 및 철도진동 소음 데이터베이스에 대한 많은 연구가 이루어지고 있다[2]. 그러나 기존 연구된 내용은 레일의 조도상태 및 방진재 사양 등 철도진동소음에 영향을 주는 인자를 충분히 포함하지 못하고 있다[3]. 또한, 측정 및 분석한 데이터를 체계적으로 관리하고 축적하는 구조를 갖추지 못했다[4]. 그 이유는 연구기관이 인위적인 데이터 양식을 사용하여 실용적이고 개방적인 데이터베이스 구조를 갖추지 못하였으며, 실제 엔지니어링 현장에서 활용하기 어렵다.

최근 철도가 도심을 통과하는 구간이나 철도 아래 역사 건

* 이 논문은 국토교통부 철도기술연구개발사업의 연구비지원(16RTRP-B072484-04)에 의하여 연구 되었음.

† 준 회 원 : 알엠에스테크놀로지(주) 연구소 책임연구원

†† 정 회 원 : 알엠에스테크놀로지(주) 연구소 선임연구원

††† 중신회원 : 선문대학교 컴퓨터공학부 교수

Manuscript Received : November 6, 2018

First Revision : December 27, 2018

Accepted : January 7, 2019

* Corresponding Author : Hwang Young Sup(young@sunmoon.ac.kr)

설이 증가하고 있다. 또한 현재 건설되고 있는 철도 노선 주변에 진동에 민감한 초정밀 산업단지 등이 위치하고 있는 경우가 있다[5]. 따라서 궤도 주변 구조물에 대한 민원 방지와 초정밀장비의 정상적인 운영 등을 위해 철도 운행으로 인해 발생하는 주변 구조물에서의 진동 및 구조소음을 정량적으로 평가할 수 있는 기술 개발이 필요하다. 일반적으로, 진동 및 구조소음을 정량적으로 평가하려면 차량과 궤도의 상호작용으로 발생하는 동적하중, 진동 전달 매체인 지반 및 구조물의 동적 특성 등을 포함하는 매우 복잡한 동적 응답 모델이 요구된다[6]. 그러나 순수한 해석적인 방법은 모델이 부정확하여 신뢰성 있는 평가가 이루어지기 힘든 실정이다[7]. 따라서 본 논문에서는 철도 환경의 구성 요소들 중 진동에 영향을 주는 요소들을 분류한 국내 철도진동소음 실측 데이터베이스를 기반으로 선로변의 특정 지점에서 구조소음을 계산하는데 필요한 철도 운행으로부터 유발되는 진동값을 추론하는 철도 진동 평가 알고리즘 및 시스템을 제안한다.

2. 철도진동특성 및 평가 알고리즘

2.1 철도 진동 소음 측정 및 분석

철도진동은 일반적으로 시간에 따른 진동 변위(m, cm, mm, μm)와 단위 시간당 변위 변화량인 속도(m/s, cm/s=kine), 단위 시간당 속도 변화량인 가속도(m/s^2 , $\text{cm/s}^2=\text{gal}$) 등을 측정한다. 가속도 센서는 변위센서, 속도센서에 비해 매우 넓은 주파수 범위와 해당 영역에서의 선형성을 보유한 동적 범위를 가지고 있으며 비교적 튼튼하고 신뢰성이 있어서 장기간동안 특성이 변하지 않는 장점이 있어 진동측정에 많이 이용한다. 측정 데이터는 DSA (Dynamic Signal Analyzer)를 이용하여 수집 및 분석을 한다. 일반적인 진동신호는 주파수가 다른 여러 성분의 집합이라 할 수 있다. 이러한 복합적인 진동을 주파수 분석하면 각 주파수 성분을 파악할 수 있으며 이를 진동 방지 대책에 활용할 수 있다. 주파수 분석기에는 전기적으로 어떤 주파수 대역의 진동을 통과시키는 필터가 내장되어 있는데 그 대역의 상한주파수와 하한주파수의 관계에 따라 정비형(Constant Percentage Bandwidth, CPB)과 정폭형(Constant Bandwidth)으로 나누어진다. 정비형은 상한 주파수(f_u)와 하한주파수(f_l)의 차이가 일정한 것으로, 흔히 narrow band라 하며, 하모닉 성분을 분석하는데 용이하다. 주파수 분석기의 분해능에 의해 주파수 대역이 결정되고 일반적인 기계진동 특성을 파악하기 위한 분석에 많이 사용된다.

$$\frac{f_u}{f_l} = 2^n \quad n = 1/1, 1/2, 1/3...1/N \quad (1) [8]$$

f_u : Upper Frequency
 f_l : Lower Frequency

정폭형은 Equation (1)과 같이, 상한 주파수(f_u)와 하한주파수(f_l)의 비가 일정한 것으로, $n=1/1$ 이면 1/1 옥타브 밴드, $n=1/3$ 이면 1/3 옥타브 밴드라 한다. 주파수가 증가할수록 밴드폭이 증가하며 좁은 차트에 넓은 주파수 영역의 도시가 가능하다[8]. 일반적으로 이러한 분석 및 도시방법은 인간이 느끼는 소음 주파수별 반응과 잘 일치하여 소음 분석에 많이 사용된다. 진동에 따른 구조소음의 경우도 인간이 느끼는 주파수 변동이 1/3 옥타브와 밀접한 관련을 가지므로 본 논문에서 진동 데이터는 1/3 옥타브밴드로 분석하여 사용한다.

2.2 철도 진동 영향 인자 분석

철도진동에 영향을 미치는 인자들은 일반적으로, 철도 차량의 레일과 차량의 마찰에 의해 발생하는 구동 진동이 차량-궤도-궤도지지구조물-지반-수진 구조물의 경로로 전파된다. Table 1은 철도 진동에 영향을 주는 인자들을 분류한 것으로써, 도심철도 대부분의 소음에 대한 민원은 구조소음에 기인하므로 분류된 영향인자의 영향을 받는다[9].

분류된 철도진동 영향인자는 실측 결과, 인자의 종류에 따라 진동 및 소음 발생정도가 상이한 결과를 보였다. 본 논문에서는 각 영향인자를 독립변수로 보고 독립변수의 차이에 따른 실측 데이터 측정값을 다원 분산분석을 수행하였다. 수행 결과, 각 진동 유발인자 차이에 따른 그룹 간 편차는 그룹 내 편차보다 커 분류한 진동 유발인자의 유의성을 확인할 수 있었다. 이에 따라, Fig. 1과 같이 철도진동 소음에 대해 영향을 주는 빈도를 나타내는 영향도의 순위를 결정 하였다. 이 순위는 새로운 측정 데이터의 추가에 따라 계산된 결과에 의해 변경되도록 시스템을 설계하였다.

Fig. 1에서 보는 바와 같이, 각 영향인자의 영향도는 거리가 가장 큰 비중을 차지하고 있고, 다음으로 궤도 및 레일의 종류, 차량 순이다. 차량데이터는 {차량종류, 차량종류, 차량 속도, 차량 대수, 화물여부[화물종류, 적재상태], 운행조건} 으로 나타내며, 이 중 속도 데이터는 numerical data 타입이다. 차량 데이터 집합 중 각 속성(Attribute)이 철도 진동 소음에 미치는 영향도는 다음과 같다. 이는 각 속성이 철도 진동 발생에 미치는 영향을 수치로 나타낸 것으로써 모든 조건이 같을 때 하나의 측정 사이트에서 거리 및 궤도, 지반 등의 조건이 같을 때를 나타낸다. 차량에 따른 측정값의 비교를 통해 계산된 차이값과 함께 차량 노후화에 따른 진동 발생량에 대한 엔지니어의 경험치를 반영하여 표현한다.

본 논문에서는 이와 같은 방법으로 궤도데이터 영향도, 궤도지지구조물 데이터 영향도, 교량에 따른 데이터 영향도 등을 분석하여 철도 진동에 영향을 주는 각 속성의 영향도를 계산하였다. 또한 계산의 편의성을 위해 추론을 위한 영향도 기준 테이블을 구성하였다. 영향도 분석 결과는 다음과 같이 거리가 가장 큰 영향을 주고 있으며 지반과 궤도지지구조가 가장 낮은 영향도를 갖는다.

Table 1. Railway Vibration Impact Factor

class 1	class 2	explanation
Rolling stock	Type	KTX, Saemaoul, Mugunghwa-ho, subway, etc..
	Speed	Km/h
	Number of Car	number of cars including locomotive
	Wheel	steel wheel, resilient wheel
	Running Condition	one way train ,turnout train
Track	Reduction type	floating slab track, vibration isolation mat, elastic rail fastener, sleeper pad
	Rail roughness	rail roughness
	Connection	conventional rail, continuous welded rail
	Track structure	ballasted track, slab track
Track Supporting Structures	Structural system	civil engineering section, bridge sections, tunnel section
Ground	Type	reclamation soil, sedimentary soil, sedimentary rock, soft rock,etc.
	Depth	m
Location	Distance	measuring distance from line
	Height	height from line
	Point	ground, vibration affected structure

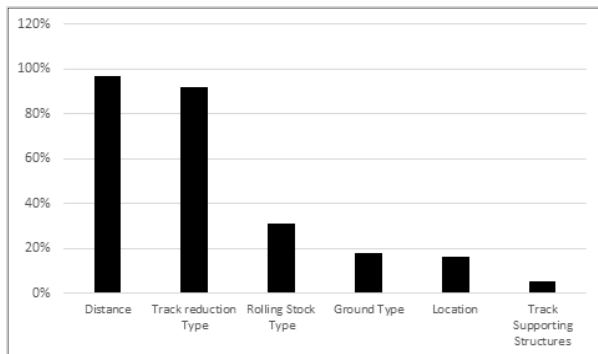


Fig. 1. Effect of Factors Affecting Railway Vibration and Noise

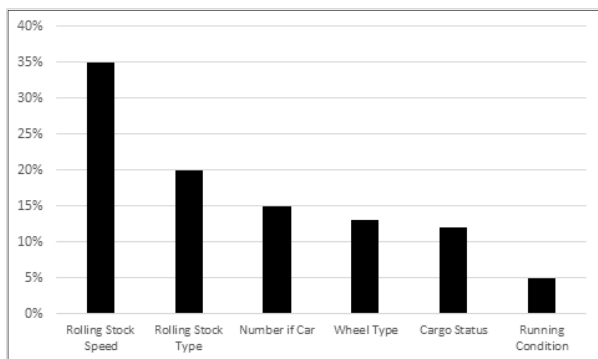


Fig. 2. Vibration Data Impact of Rolling Stock

Distance > Track > Rolling Stock > Ground Type > Track Supporting Structures

2.3 철도 진동 데이터 학습 및 추론 알고리즘

본 시스템의 결과 값에 가장 큰 영향을 주는 진동 유발 인자는 분석결과 선로부터의 거리임을 알 수 있다. 일반적으로 거리에 대한 진동 값은 Fig. 3에서 보는 바와 같이 각 주파수 별로 진동 값을 분석했을 때 선로부터의 거리가 멀어짐에 따라 감소하는 1차 함수의 형태를 띠고 있다. 본 논문에서는 이를 이용해 Linear Regression과 Gradient Descent 기법을 통해 1차 함수 ($y = w_1x + w_2$)의 가중치 w_1 과 w_2 를 찾아내는 방식으로 진동 값을 추론하였다.

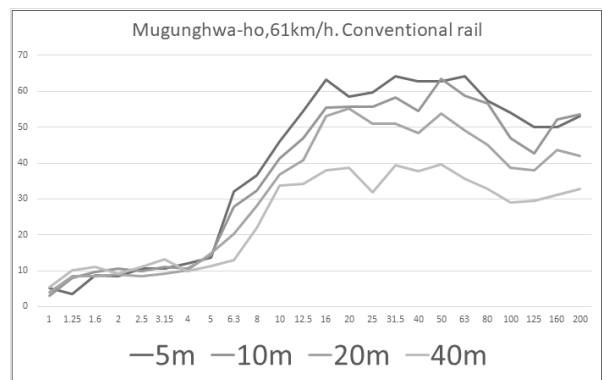


Fig. 3. Trend of Railway Vibration on Distance

Linear Regression은 1차 함수를 이용해 data를 fitting하는 방식으로 $y = w_1x + w_2$ 의 각 상수를 정확히 알게 되면 데이터의 예측이 가능해짐을 이용하는 기법이다[10]. Gradient Descent는 1차 함수의 특징을 이용해 임의의 상수값을 대입하여 이상적인 값을 찾아내는 것이다. 본 논문에 적용한

Gradient Descent 과정은 먼저 w_2 의 초기 가중치의 값을 식 (2)를 이용하여 결정한다. $\max(D)$ 는 전체 데이터 중 최대값을 나타내며, $\min(D)$ 는 최소값을 나타낸다. 이를 2로 나누어 전체 데이터를 벗어나지 않는 범위내의 초기 가중치를 결정한다.

$$\frac{\max(D) - \min(D)}{2} \quad (2)$$

또한 Equation (3)의 값을 계산하여 나온 값을 w_1 을 찾기 위한 변화량(Learning Rate)으로 결정한다. Equation (3)에서 $count(D)$ 는 전체 데이터의 개수이다. 본 논문에 적용한 철도진동 데이터에서는 0.01의 Learning Rate가 계산되었다.

$$\frac{\max(D) - \min(D)}{count(D)} \quad (3)$$

w_1 과 w_2 의 초기 가중치에서부터 Learning Rate에 의해 증가 또는 감소 시켜가며 실측 데이터와 가장 유사한 값을 찾는다. i 번째 데이터에서 실측값과 수식으로 부터 추론값의 차이를 d_i 라 하면 전체 데이터간의 차이는 식(4)와 같이 표현할 수 있다.

$$\delta = \frac{ABS(d_1) + ABS(d_2) + \dots + ABS(d_n)}{n} \quad (4)$$

δ 는 해당 수식이 갖는 실측값과의 차이, 즉 계산된 w_1 과 w_2 의 정확도를 나타낸다. 따라서 δ 가 최소화 되는 값을 찾기 위해 본 논문에서는 Gradient Descent Optimizer 기법을 이용하였다. 일반적인 regression 학습의 경우, 학습을 위한 hypothesis를 결정하고 hypothesis의 각 해를 구하는 방식을 취한다. 거리에 따른 철도 진동 데이터의 감쇠는 이론적으로 log식의 경향을 갖지만 실제 측정 데이터 분석결과 철도 진동 유발인자들에 따라 1차식, 다항식, 지수식, 로그식 등 4가지의 추세 중 하나를 따르는 것으로 분석되었다. 따라서 본 논문에서는 Table 2와 같이 4가지의 hypothesis를 두고 학습할 hypothesis를 찾는 과정을 추가하였다. 데이터베이스에 존재하는 유사 데이터들은 진동 유발인자의 조합에 따라 추세가 달라질 수 있다. 따라서 hypothesis를 미리 정의해 적용하기에는 무리가 있으므로 4가지의 hypothesis를 모두 적용해 실측 데이터 값과 비교하여 해당 조합의 대표적인 실측값과 가장 유사한 값을 찾고 해당 수식을 activation function 으로 선정한 후 학습에 이용하였다. 단, 다항식의 경우에는 데이터의 추세에 따라 차수가 급격히 늘어날 수 있으므로, 2차식으로 한정하여 $\omega_1, \omega_2, \omega_3$ 세 개의 가중치 값만을 추론한다.

예를 들어, 일반궤도에서의 60km/h 속도의 무궁화호에 대해

Table 2. Activation Function

hypothesis	equations	training factor
Exponential	$y = \omega_1 e^{\omega_2 x}$	ω_1, ω_2
Linear	$y = \omega_1 x + \omega_2$	ω_1, ω_2
Logarithm	$y = \omega_1 \ln(x) + \omega_2$	ω_1, ω_2
Polynomial	$y = \omega_1 x^2 + \omega_2 x + \omega_3$	$\omega_1, \omega_2, \omega_3$

거리에 따른 진동값에 대한 데이터를 이용해 각 hypothesis를 적용해 학습했을 때 학습된 training factor를 적용하여 계산된 진동 추론값(빨간선)을 실측 진동값(파란선)과 비교하면 Fig. 4와 같은 결과를 얻을 수 있다. 이 때, Equation (5)에 따라 각 실제 데이터와의 차이(cost)를 계산하여 Table 3과 같은 cost table을 작성한다. $H(x)$ 는 예측값을, y 값은 실제값을 나타내며, m 은 데이터 개수를 뜻한다.

$$cost = \frac{1}{m} \sum_{i=1}^m (H(x^{(i)}) - y^{(i)})^2 \quad (5)$$

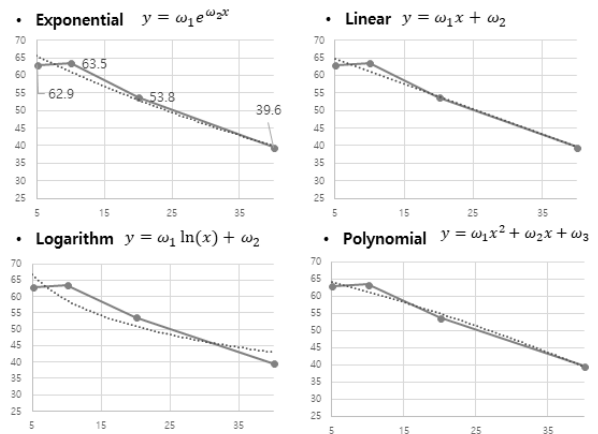


Fig. 4. Example of Hypothesis

Table 3. Result of Hypothesis Cost

Distance	target	exp	linear	log	poly
5	62.9	75.4102	63.74	66.89665	61.158
10	63.5	56.43787	61.18	58.93932	61.091
20	53.8	49.06472	54.06	50.98199	54.882
40	39.6	37.08232	39.82	43.02466	39.364
COST		230.4	8.8	47.6	7.6

Table 3에서 볼 수 있듯이, 속도 60km, 무궁화호의 경우에서 거리에 따른 실측 진동값(target)과 가장 유사한 결과를 보이는 hypothesis는 다항(poly) 함수인 것을 알 수 있다. 따라서 시스템에서는 다항(poly) 함수를 해당 조합의 activation function으로 선정한다. 본 논문에서는 이와 같이, 계산된 결과에 따라 cost가 가장 낮은 hypothesis를 activation function으로 선정하고,

추론할 때 학습한 factor를 대입하여 오차율을 줄였다. 학습을 위해 가속도 센서의 측정 가능 범위인 10Hz~200Hz 주파수 영역의 1/3 옥타브밴드 데이터를 사용하였다. 학습에는 3,743건의 각 주파수별 철도 진동 실측 데이터를 이용하였다.

새로운 데이터가 입력되면 Fig. 5와 같이 처리한다. 우선 기존 데이터베이스 시스템에 구축된 데이터 분류 및 저장 프로세스를 거친다. 그리고, numerical data와 categorical data에 대한 activation function을 새롭게 계산한 후 output (activation function) table을 update한다.

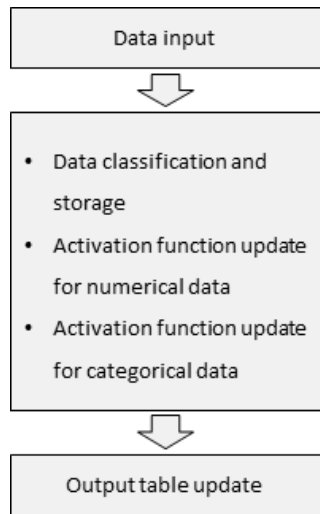


Fig. 5. New Data Input

추론 알고리즘은 위와 같이 업데이트 된 output table을 기반으로 Fig. 6과 같이 동작한다. 사용자의 요구사항이 입력되면 시스템은 해당 요구사항을 분석하여 output table에 있는 진동유발인자들의 조합과 비교한다. 이후 가장 유사한 레코드에 기록된 hypothesis를 이용한다.

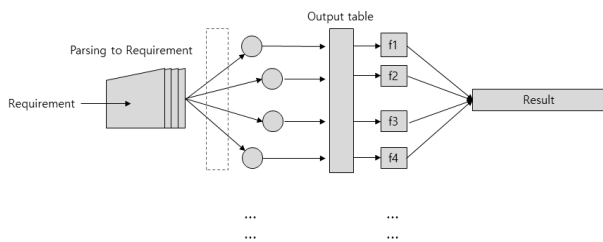


Fig. 6. Prediction Algorithm Process

2.4 시스템 구현

본 논문에서 제안한 알고리즘을 탑재한 데이터베이스 기반 추론 시스템은 사용자의 접근성을 고려하여 Fig. 7과 같이, web 기반으로 구축되었다. regression을 위한 framework은 ConvNETJS[3]를 사용하였으며, DBMS는 Microsoft MS-SQL을 적용하였다. Javascript 기반의 UI구성으로 별도의 인스틀

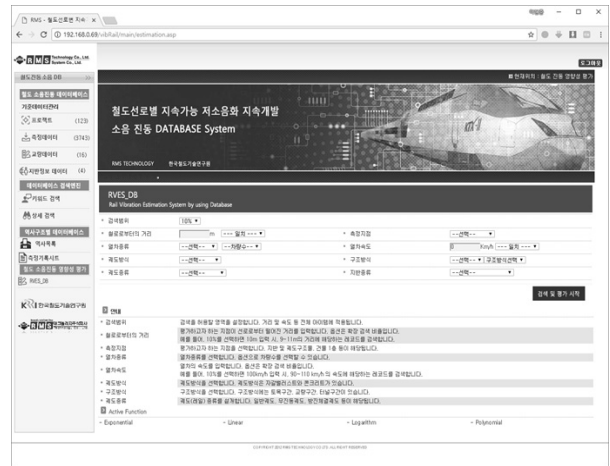


Fig. 7. Web-based Railway Vibration&Noise Prediction System

과정 없이 WWW(World Wide Web)을 통해 접속하여 사용할 수 있다.

전체 데이터 구조는 하나의 측정작업을 기준으로 차량정보, 측정정보, 환경정보 등의 하위 정보들이 종속되어 있는 형태로 구성되어 있다. 이는 머신 러닝 적용을 위해 Classification을 수행하여 얻어내는 결과와 동일한 구조를 가지고 있으며, 철도 환경의 특성 상, 새로운 진동 유발 인자들의 교체가 쉽게 이루어지지 않으므로 구축된 데이터베이스 구조를 이용하여 가중치 계산에 대한 결과 값을 activation function에 저장하여 추론시, 데이터베이스 검색을 이용해 결과 값을 도출한다.

2.5 철도진동 추론

사용자로부터 입력받은 진동유발인자들의 조합에 의해 도출할 수 있는 경우의 수는 Fig. 8에서 볼 수 있듯이 2,168가지이며, 새로운 철도 유발인자가 추가될 시 증가할 수 있다.

예를 들어, “일반궤도”로부터 15 m (검색범위: 0%) 떨어진 “지반” 위치에서 “KTX”열차가 “193km/h” (검색범위: 0%)의 속도로 지나갈 때의 진동 값을 예측하고자 할 때 Fig. 7과 같은 페이지에 Table 4와 같이 입력한 후 ‘검색 및 평가시작’ 버튼을 누르면 시스템이 동작하도록 구현하였다.

사용자는 각 진동 유발인자들에 대해 입력하고 평가 시작 버튼을 누르면 시스템은 먼저 사용자로부터 입력받은 인자들의 조합에 해당하는 측정 데이터를 데이터베이스 내에서 검색한다. 이 때, 검색된 결과가 있으면 해당 데이터베이스 내용을 출력한다. 그러나 사용자의 요구에 맞는 데이터가 없을 시에는 추론 시스템을 동작한다. 먼저 진동 유발인자 중 가중치가 가장 높은 순서에 따라 reference data set을 데이터베이스로부터 가져온다. 이후 2.3에서 설명한 알고리즘에 따라 activation function의 training factor를 이용하여 numerical data에 대한 추론을 수행하고 그 결과를 바탕으로 categorical data에 대한 정량적 비교를 통한 결과를 재귀적으로 반영하여 Fig. 9와 같은 최종 결과를 출력한다. 시스템은 사용자의 편의성을 위해

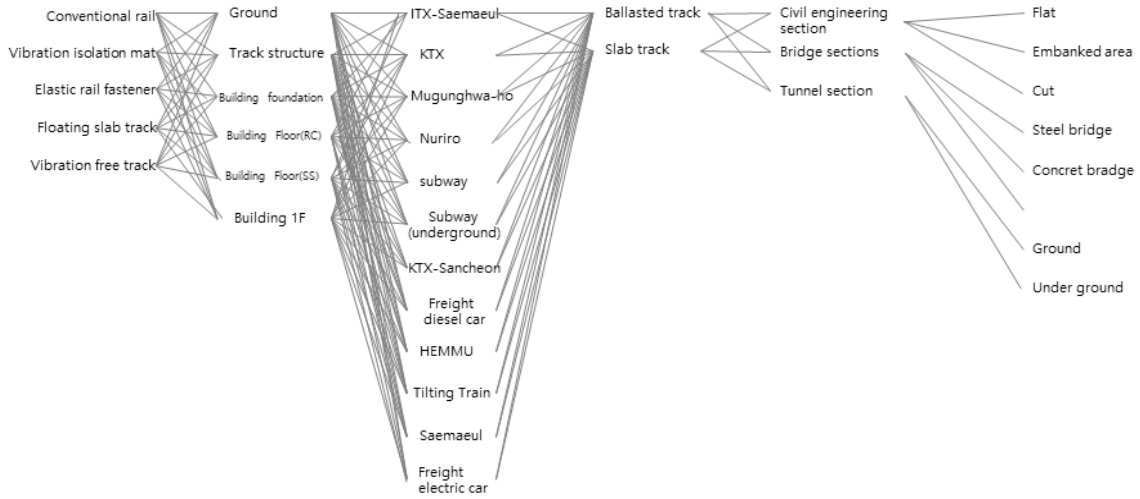


Fig. 8. Number of Vibration-Induced Factors Selected

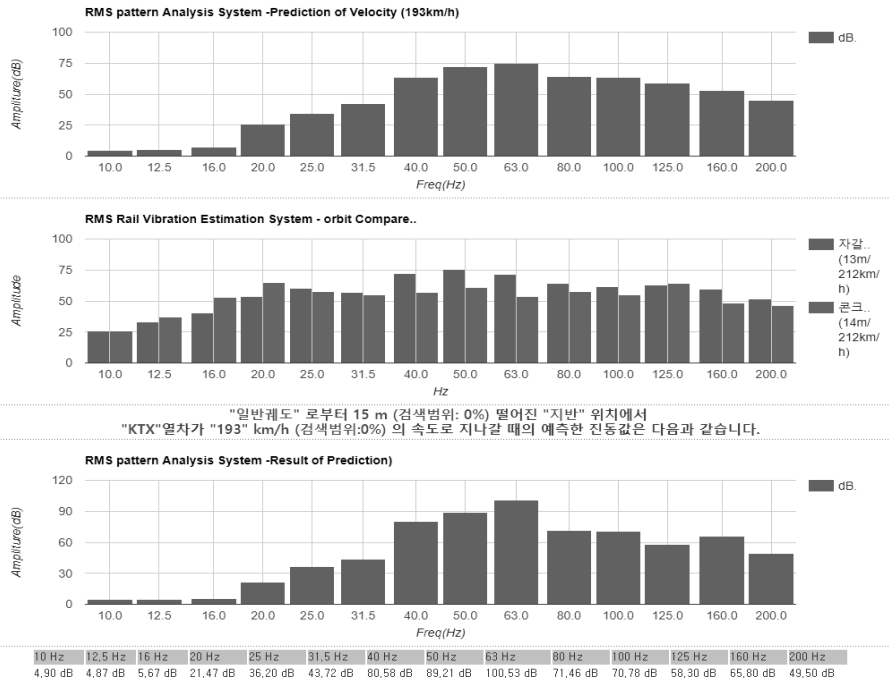


Fig. 9. Result of Prediction on System

브라우저를 통해 웹(www) 상에서 동작되도록 구현하였다. 또한, 사용자로부터 입력된 진동 유발인자 조합에 따라 데이터베이스에서 추출한 유사 데이터와 추론의 각 단계를 순차적으로 디스플레이 하였다.

Table 5는 실측 진동 값 13m, 20m와 데이터베이스를 기반으로 추론한 값 15m를 비교한 결과를 나타낸다. 표에서 알 수 있듯이 추론 결과는 각 주파수 별 예측 값을 나타내고 있으며, 진동 발생원(철로)으로부터 거리에 따라 점차 감소하는 철도 진동 데이터의 추세를 반영하고 있으며, 실측 데이터인 13m와 15m 측정 데이터의 차이 값을 가짐을 알 수 있다.

Table 4. Example of Input Data

factor	value
Measuring distance from line	15m
Rolling stock type	KTX
Rolling stock speed	193 Km/h
Track structure	Ballasted track
Track connection	Continuous welded rail
Measurement Point	Ground

Table 5. Result of Prediction

Freq.(Hz)	13m	15m	20m
10	8.1	4.9	6.0
12.5	6.1	4.8	4.1
16	15.3	5.67	10.7
20	29.7	21.47	28.5
25	39.3	36.2	36.9
31.5	45.2	43.72	39.7
40	66.8	80.58	80.5
50	89.8	89.21	72.6
63	105.6	100.53	66.5
80	71.1	71.46	55.9
100	69	70.78	62.3
125	65.7	58.3	52.7
160	59.2	65.8	58.5
200	52.8	49.5	57.7

3. 해석 및 측정

본 논문에서 제안하는 데이터베이스 기반의 추론 시스템의 효용성을 증명하기 위해 실제 측정 및 해석을 수행하였다. 열차 민원이 발생하는 지점을 선정하여 측정 실험을 진행하였다[11]. 더불어 유한요소 해석을 수행하였다. 이후, 본 논문에서 제안하는 시스템을 통해 추론한 값과 해석데이터, 측정 데이터를 비교하였다.

3.1 열차 진동 측정

전철 운행 구간 중 특히 취약할 것으로 예상되는 지역을 선택하여 진동 특성을 파악하였다.

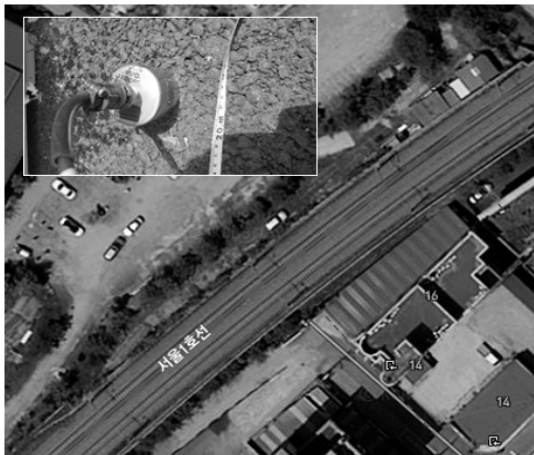


Fig. 10. Place of Measurement & Vibration Sensor

Fig. 10은 철도 진동 특성 파악을 위해 선정된 위치와 센서 설치 사진을 보여준다. 해당 지역은 서울 1호선 전철이 지나가는 선로 옆에 위치한 숙박시설로 철도 진동에 의한 구조소음의 피해를 받는 지역이다. 선로로부터 거리 5m, 15m, 25m, 세 지점을 측정 하였으며 측정결과는 Fig. 11과 같다.

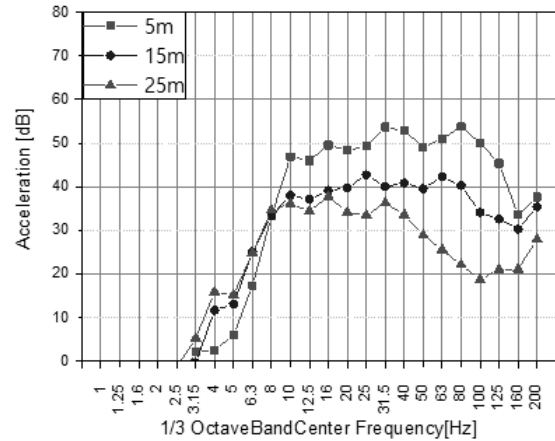


Fig. 11. Result of Measurement

3.2 해석 모델

전철 운행 구간을 따라 여러 건물들과 구조물들이 배치되어 있지만 특히 취약할 것으로 예상되는 지역을 국부적으로 모델링하여 이의 진동 특성을 파악하였다. 해석 모델은 지상 7층의 지반을 포함하는 Fig. 12의 건축물을 구축하였으며 해석 모델의 구속 조건 중 최외각 요소는 반사파의 영향을 고려한 무한감쇠 요소를 적용 하였으며 경계부는 Symmetric 경계 조건을 적용 하였다[12]. 모델의 요소(Element)는 BEAM188, SHELL63, SOLID45를 사용하였으며 이 중에서 BEAM188은 기둥(Column), 거더(Girder),빔(Beam)을, SHELL63은 슬라브를, SOLID45는 지반을 표현하는데 사용하였다[13].

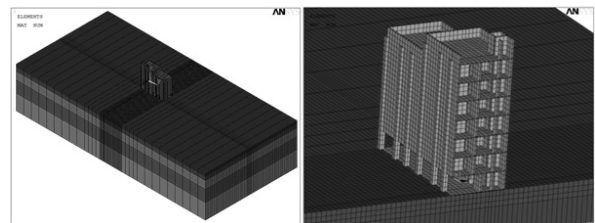


Fig. 12. Analytical Model

본 모델의 시간 응답 거동을 확인하기 위하여 타임 도메인에서 열차가 이동되는 하중을 모사되도록 시간 변화에 따른 하중을 대차 간격으로 입력 노드를 배치하였다. 이후, 전철 운행에 해당되는 동하중(Fig. 13)을 입력하고 이를 시간 영역에서 해석하였다. 그리하여, 하중이 가해지고 시간의 흐름에 따라 바뀌 하부에서 발생하는 진동파가 전달되어 관심 있는 건축 구조물을 진동시키는 거동을 모사할 수 있었다. 이때, 거리에 따른 건축 구조물 노드점을 관찰하고 진동 응답 신호를 추출하였다.

전철 운행 중에 발생하는 진동은 횡과 레일이 가지고 있는 가진력이 레일을 지지하고 있는 지반을 가진(共振)하여 발생한다. 이 진동은 지반을 매질로 삼아 전파되어 건물에 전달된

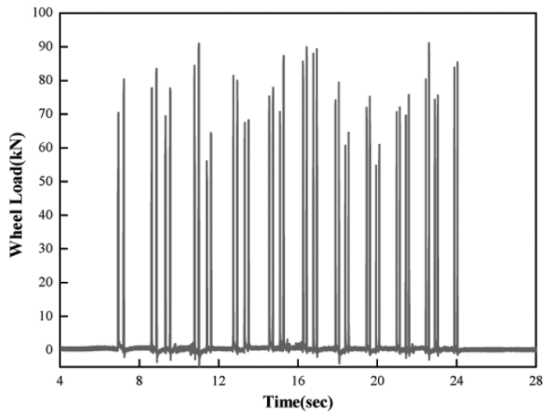


Fig. 13. Vibration Input Source[4]

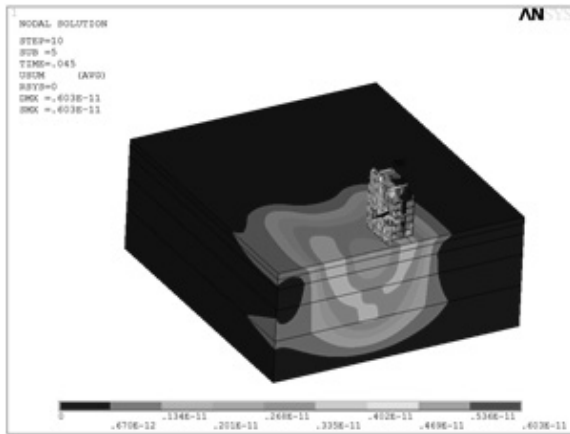


Fig. 14. Vibration Response Distribution

다. <진동 응답 분포>는 시간에 따른 건물의 진동 응답을 보여준다. Fig. 14와 같이 하중이 가해지고 시간에 따라 진동파가 전달되어 건물에 영향을 주는 것을 확인할 수 있다.

3.3 시스템 추론 비교 분석

데이터베이스를 기반으로 추론을 위해 다음과 같이 진동 유발인자를 입력하여 추론 시스템을 동작시켰다. 이후, 추론된 결과와 측정값, 해석 값을 비교하여 Fig. 15와 같은 결과를 얻을 수 있었다.

본 논문에서 제안하는 시스템에 의한 추론은 10Hz 영역에서 200 Hz 영역까지 수행한다. 결과를 보면 해석값과 실제 측정값의 차이가 큰 것을 알 수 있다. 열차로부터 발생하는 진동은 지반에 전파되고 건물을 통해 전달되어 건물에서의 진동이 유발되므로 진동 해석을 위해 진동원, 지반, 건물의 복합적인 작용을 고려해야 한다[14]. 그러나 매우 큰 지반영역을 모델링하기 때문에 자유도가 많고, 지반과 구조물간에 작용하는 효과와 탄성파의 전파 효과에 대한 정확한 값을 산정하기가 어려워 실제 측정값과의 차이가 생긴 것으로 파악된다[15]. 측정값과 추론값을 비교 했을 때는 Table 5와 같은 유발인자의 조합에 해당하는 레코드가 데이터베이스에 존재하지 않더라도 저장된 유

사 데이터로부터 생성한 추론식을 이용하므로 측정값과 유사한 결과를 얻을 수 있었다. Table 6은 측정값에 대한 해석값과 추론값의 정확도를 나타내고 있으며 표에서 알 수 있듯이 해석 결과에 비해 추론 값이 실제 측정값의 차이가 적음을 알 수 있다. 해석결과의 경우에는 실제 값보다 낮은 결과를 얻을 수 있었지만, 추론 값의 경우에는 보유 데이터의 추세에 따라 주파수별로 초과하는 결과 값(100% 초과)도 표현된다.

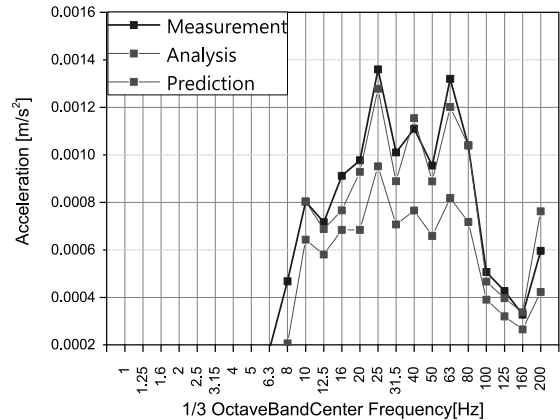


Fig. 15. Comparison of Measured Values, Analytical Values, and Inference Values

Table 6. Input Data

factor	value
Measuring distance from line	15m
Rolling stock type	subway
Rolling stock speed	42 Km/h
Track structure	Ballasted track
Track connection	Conventional rail
Measurement Point	Ground

Table 7. Accuracy Comparison (Analysis or Prediction / Real Data * 100)

Frequency(Hz)	Analysis	Prediction
10	80%	100%
12.5	81%	96%
16	75%	84%
20	70%	95%
25	70%	94%
31.5	70%	88%
40	69%	104%
50	69%	93%
63	62%	91%
80	69%	100%
100	77%	92%
125	75%	93%
160	81%	103%
200	71%	128%

4. 결 론

본 논문에서는 사용자로부터 입력받은 진동 유발인자를 매개로 실측 데이터베이스를 이용하여 철도 진동 및 구조소음을 평가하는 알고리즘과 이를 구현한 시스템을 제안하였다. 제안한 시스템은 실측 데이터들의 특성을 이용하므로 데이터베이스의 데이터양이 많아지면 많아질수록 정확도가 높아진다. 또한, 철도 환경의 특성 상 안전관리 및 환경제약이 많아 측정 작업이 어렵고, 모델링을 위한 요소들의 특성이 부정확해 해석에 의한 정확도가 떨어지는 문제를 신뢰성 있는 실측 데이터를 이용하여 해결하였다. 제안한 시스템은 3D 해석적 방법에 비하여 보다 높은 정확도와 함께 숙련된 엔지니어의 경우에도 10시간 이상이 소요되는 3D모델링 작업 소요시간을 줄일 수 있었다. 본 논문에서 제안하는 알고리즘 및 시스템은 효율적이고 경제적으로 구조소음을 포함한 철도 진동 환경영향평가를 진행할 수 있는 새로운 방법이다. 향후, 딥러닝 기법을 이용하여 알고리즘을 보완하고 실측 철도 진동 데이터베이스 보완으로 알고리즘의 정확도를 높일 예정이다.

References

[1] Indoor Environment and Noise Research Team, Climate and Air Quality Research Department, "Calculation of the number of inhabitants exposed to railway noise," *National Institute of Environmental Research*, 2014.

[2] Hong-gi Lee, Hyun-jun Lee, and Sung-wan Son, "Design of railway noise and vibration Database considering noise source of railway noise complaints focused area," *KSNVE Annual Autumn Conference*, pp.812-816, 2014.

[3] ConvNetJS: Deep Learning in your browser [Internet], <https://cs.stanford.edu/people/karpathy/convnetjs/index.html>

[4] Jung-Youl Choi, Yong-Gul Park, and Sang-Min Lee, "The Evaluation of Track Impact Factor on the Various Track Type in Urban Transit," *Journal of the Korean Society for Railway*, Vol.14, No.3, pp.248-255, 2011.

[5] Choi Sanghyun, Kim Minseu, and Joe Yang-hee, "Noise Mitigation Characteristics of Precast Floating Track System Considering Vehicle-Track-Structure Interaction." *Journal of the Korean Society for Advanced Composite Structures*, Vol.8, No.1, pp.39-45, 2017.

[6] Sa-beom Suh, "A Study on the Track Model for Dynamic Analysis, Railway Journal," Vol.20, No.2, pp.21-33, 2017.

[7] Do-Yeun Kim, Yun-Sang Jeung, Eun-Gu Kang, Hyun-Geun An, You-Jin Kim, Ji-Hun Choi, Jae-Won Cha, Soon Park, and Jeong-Soo Park, "Analysis of railway system new technology development trend," *KSR Autumn Conference*, pp.91-96, 2017.

[8] Il-Rok Chung, Jae-Ryong Kim, Se-Cheol Youn, and Tar-Ho Lee, "Latest Noise and Vibration(Theory and Practice)," pp.31, Singwangmunhwas, 2004.

[9] Hyung-doo Kim, "A Study on the Prediction and Evaluation of Train Noise in the Dense Buildings," *Journal of the Korean Society of Mechanical Technology*, Vol.20, No.3, pp.294-299, 2018.

[10] D. C. Montgomery, E. A. Peck, and G. G. Vining, *Introduction to linear regression analysis*, Vol. 821, John Wiley & Sons, 2012.

[11] Notice of Ministry of Environment No. 2013-172, *Standards on Testing the Noise and Vibration Processes*, pp.129-123, 2013.

[12] Sang-Ki Park, Ki-Sun Choi, and Young-Chan You, "Study on vibrations and its reduction effects on the structure due to train-induced vibration using time history analysis," *KSMI Autumn Conference*, pp.669-670, 2013.

[13] Jong-Jae Lee, *Ground Vibration Analysis for Train Transit Loadings*, Master's thesis, KAIST, 1989.

[14] Sin-Chu Yang, Seong-Won Lee, "Analysis of Vibrations of a Structure Neighboring a Railway Bridge Induced by High-speed Train Running," *Journal of the Korean Society of Civil Engineers*, Vol.17, pp.443-445, 1997.

[15] Chung-Bang Yun, Dong-Guen Lee, Jin-Sang Chung, and Doo-Kie Kim, "Dynamic Analysis of Building Structure under Subway Transit Loadings," *Journal of the Korean Society of Civil Engineers*, Vol.17, pp.25-34, 1997.



이 현 준

<https://orcid.org/0000-0002-9562-4670>

e-mail : lhj@rmstech.co.kr

2007년 선문대학교 전산학과(석사)

2010년 선문대학교 컴퓨터정보학(박사)

2011년~현 재 알엠에스테크놀로지(주)

연구소 책임연구원

관심분야 : 데이터베이스, 인공지능, DAQ System



서 은 성

<https://orcid.org/0000-0002-1413-9615>

e-mail : ses@rmstech.co.kr

2009년 서울과학기술대학교 기계공학과

(학사)

2011년 서울과학기술대학교

에너지시스템공학과(석사)

2011년~현 재 알엠에스테크놀로지(주) 연구소 선임연구원

관심분야 : Noise & Vibration



황 영 섭

<https://orcid.org/0000-0002-8713-9253>

e-mail : young@sunmoon.ac.kr

1997년 포항공과대학교(POSTECH)

컴퓨터공학(박사)

2002년~현 재 선문대학교 컴퓨터공학부

교수

관심분야: 패턴인식, 신경망, 머신러닝, Bioinformatics