

# 베이지안 회귀 및 상관분석을 통한 지하철 진동발전 모델의 수정과 기전력 분석

조 병 완<sup>1\*</sup> · 김 영 석<sup>1</sup> · 이 윤 성<sup>1</sup> · 김 윤 기<sup>1</sup>

<sup>1</sup>한양대학교 건설환경공학과

## A Fundamental Study on Analysis of Electromotive Force and Updating of Vibration Power Generating Model on Subway Through The Bayesian Regression and Correlation Analysis

Byung-Wan Jo<sup>1\*</sup>, Young-Seok Kim<sup>1</sup>, Yun-Sung Kim<sup>1</sup> and Yun-Gi Kim<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Department of Civil and Environmental Engineering, Hanyang Univ., Seoul, 133-791, Korea

### Abstract

This study is to update of vibration power generating model and to analyze electromotive force on subway. Analysis of electromotive force using power generation depending on classification of locations which are ballast bed and concrete bed. As the section between Seocho and Bangbae in the line 2 subway was changed from ballast bed to concrete bed, it could be analyzed at same condition, train, section. Induced electromotive force equation by Faraday's law was updated using Bayesian regression and correlation analysis with calculate value and experiment value. Using the updated model, it could get 40mV per one power generation in ballast bed, and it also could get 4mV per one power generation in concrete bed. If the updated model apply to subway or any train, it will be more effective to get electric power. In addition to that, it will be good to reduce greenhouse gas and to build a green traffic network

**Keywords** : energy harvesting, dynamic characteristic, bayesian regression, induced electromotive

### 1. 서 론

환경파괴와 지구 온난화의 원인인 온실가스 배출이 화두가 되고 있는 가운데, 화석연료 사용으로 발생하는 CO<sub>2</sub>는 지구 온난화의 주범이다. GCF 녹색기후기금 유치와 같이 국내 및 세계적으로 온실가스 감축과 기후변화에 대해 민감하게 접근하고 있다. 우리나라는 기후변화행동 연구소 자료 2012년 기준 이산화탄소 배출량이 7억3천900만 Ton으로 세계 7위이며 증가율으로는 세계 3위이다. 대부분의 온실가스는 산업 분야에서 발생하지만, 교통 및 수송부분에서도 약 24%를 차지하는 것으로 나타나고 있다. 따라서 최근 국내외의 연구 동향을 살펴보면 교통 및 수송부분의 온실가스 감축 방안으로 교통시설을 이용한 신재생에너지 및 에너지 회수기술 분

야에 많은 관심이 집중되고 있다.

현재 진행되고 있는 국내 연구에서는 고속철도 교량의 진동저감(Choi *et al.*, 2006)등과 같은 철도 및 지하철에서 발생하는 진동 및 소음의 저감에 관한 연구가 진행되고 있으며, 일본 철도회사인 JR과 일본 도쿄도 아다치구 고시키사쿠라 대교(2007) 교량은 발생하는 진동을 압전 소자를 이용하여 전력 생산하고, 이스라엘 Innowatech에서는 압전 소자를 이용하여 도로 포장체에 매설하여 차량이 지나갈 때 가해지는 압력으로 수력화 시스템을 작동시켜 발전하고 있다.

따라서 본 연구에서는 기존연구와 달리, 도시, 사회, 환경, 철도 및 지하철에서 발생하는 진동을 저감하는 관점이 아닌 전기적 에너지로 회수하는 방법과 기존 연구들의 압전 소자가 아닌 유도 전기의 페러데이 법칙 및 렌츠의 법칙을 이용

\* Corresponding author:

Tel: +82-2-2220-0327; E-mail: joycon@hanmail.net  
Received December 26 2012; Revised April 4 2013;  
Accepted April 5 2013

©2013 by Computational Structural Engineering Institute of Korea

This is an Open-Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License(<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

한 전자기 유도를 통해 철도 레일 구조체의 진동을 전기에너지로 변환시키는 진동력 발전 시스템을 자갈도상 및 콘크리트 도상의 침묵에 설치하여 동특성 분석 및 관측 기전력 량의 신뢰성 검증을 위해 베이지안 회귀 및 상관도 분석을 실시하였다.

2. 연구동향 및 이론적 배경

2.1 연구 동향

화석 에너지 사용은 환경 파괴와 지구 온난화 그리고 제한된 자원으로 인한 고갈의 문제를 가짐으로서 이를 대체할 수 있는 다양한 에너지 사업의 필요성이 제기되고 있다. 여기에 신재생에너지의 개발뿐만 아니라 지금까지 이용할 수 없었거나 버려진 에너지를 끌어 모으는 ‘에너지 회수 기술(Energy Harvesting)’과 관련된 연구들을 대학이나 연구기관, 기업에서 주도적으로 진행하고 있다.

우선 대체 에너지에서 가장 중요한 것은 수확 가능한 에너지원이다. 이러한 에너지원들은 언제든 수확할 수 있는 에너지원이 있고, 환경과 조절이 불가능한 상황 같은 주변 영향 인자에 따라 지속적인 에너지 회수가 불가피 한 에너지원들이 있다. Table 1은 에너지원들의 특징 및 분류이다(Kim *et al.*, 2011).

압전소자를 이용한 에너지 회수기술은 효율과 발전량이 큰 폭으로 향상되면서 실제 적용한 사례도 있다. 일본 철도회사인 JR은 승객이 지하철 개찰구를 통과할 때 일으키는 진동을 이용하여 6000W 생산하였으며, 일본 도쿄도 아다치구 고시키사쿠라 대교(2007) 교량에서 발생하는 진동을 활용하여 압전소자를 통해 경관 조명으로 사용하고 있다. 또한 이스라엘 Innowatech에서는 압전 소자를 이용하여 도로 포장체에 매설하여 차량이 지나갈 때 가해지는 압력으로 수력화 시스템을 작동시켜 발전하고 있다.

위 동향과 같이 진동에 관한 에너지 회수는 보통 압전 소

자를 이용하고 있으나 본 논문에서는 철도 및 지하철에서 압전 소자가 아닌 전자기 유도 법칙을 이용한 진동력 발전장치를 이용하여 진동에너지에서 전기에너지 회수방안을 적용하고 효율성을 찾고자 한다.

2.2 이론적 배경

철도에서 발생하는 열차의 하중 및 진동은 횡침목과 침목 하부의 자갈도상 또는 콘크리트 슬래브 도상으로 전달되어 감쇠 된다. 열차의 이동하중으로 인해 발생하는 진동에너지를 전기에너지로 변환하여 축전을 하고 사용할 수 있도록 페리데이 법칙을 이용한 상하 진동형 발전장치를 적용하였다.

전자기 유도의 기본 원리는 자기장을 변화시켰을 때 전압이 유도되어 전류가 흐른 현상을 이용하는 것이다. 즉, 코일 속에 자속을 변화시켜 코일 속을 지나가는 자기력선에 변화를 주면 코일에 전기가 발생된다. 전류의 세기는 코일의 감은 횟수와 자기력선의 변화에 비례하여 커진다.

렌츠와 페리데이 법칙과 렌츠의 법칙을 이용한 유도 기전력 식은 식 (1)과 같다.

$$\epsilon = (-)n \frac{\Delta\Phi}{\Delta t} = (-)n \frac{\Delta(BS)}{\Delta t} (V) \quad (\Phi = BS) \quad (1)$$

여기서, (-)는 유도기전력의 방향을 나타내고,  $\epsilon$ 는 유도 기전력(V),  $n$ 은 코일권수,  $\Delta\Phi$ 는 자속변화량(Wb),  $\Delta t$ 는 시간의 변화량(s),  $B$ 는 자속밀도(Wb/m<sup>2</sup>),  $S$ 는 자기장이 지나는 면적(m<sup>2</sup>)이다.

진동력 발전장치의 역학적 구조는 Fig. 1과 같이 스프링 상수  $K$ 와 질량  $M$ , 감쇠계수  $C$ 로 이루어진 역학적 힘의 평형을 뉴턴의 법칙에 따라 운동방정식을 임의 하중  $P(t)$ 가 주어질 때,  $u(t)$  정적평형위치를 기준으로 측정된 변위 기준으로 정리해 보면 식 (2)와 같다.

Table 1 Classification by Characteristic of Energy Source

Energy Source	Characteristics	Amount of Energy Available	Harvesting Technology	Conversion Efficiency	Amount of Energy Harvested
Solar	Ambient, Uncontrollable, Predictable	100mW/cm <sup>2</sup>	Solar Cells	15%	15mW/cm <sup>2</sup>
Wind	Ambient, Uncontrollable, Predictable	-	Anemometer	-	1200mWh/day
Finger motion	Active human power, Fully controllable	19mW	Piezoelectric	11%	2.1mW
Footfalls	Active human power, Fully controllable	67W	Piezoelectric	7.5%	5W
Vibrations in indoor environments	Ambient, Uncontrollable, Unpredictable	-	Electro magnetic Induction	-	0.2mW/cm <sup>2</sup>

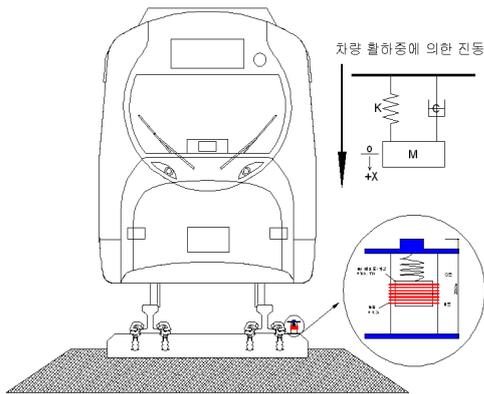


Fig. 1 Concept of vibration power generating model and installation

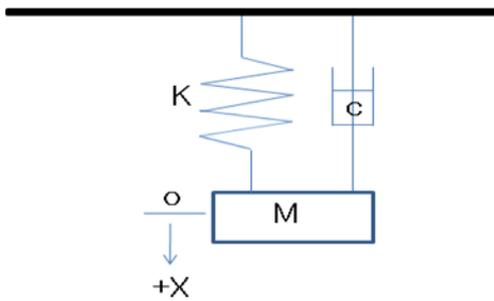


Fig. 2 Equation of Force in Vibration Power Generating Model

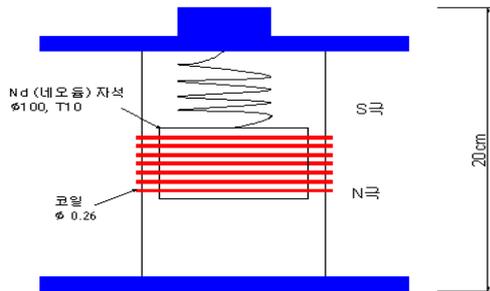


Fig. 3 Vibration Power Generating Model

$$m\ddot{u}(t) + c\dot{u}(t) + ku(t) = P(t) \quad (2)$$

식 (1)과 식 (2)을 통해서 수직 거동을 통한 이론적 기전력 도출 식은 식 (3)과 같다(Jo et al., 2010).

Table 3 Frequency characteristics that occur in each element of the train

Component		Frequency (Hz)	Acceleration (g)
Axle	Body	1	1~0.2
	Bogie	10~20(30~60)	1~3, 2~5
	Wheel	40~60	2~15
Railroad (Track)	Rail Sleeper Bed	30~60	2~15
Roadbed	Surface Elevated	- 30~70	- 0.2~1
Ground	Under	-	-
	10m	15~20	0.03~0.05
	20m	15~25	0.02~0.03



Fig. 4 Survey Acceleration Response of Concrete Bed



Fig. 5 Survey Acceleration Response of Ballast Bed

$$\epsilon(t) = -nB(2\pi r)\dot{u}(t) = -nB(2\pi r)\frac{d}{dt}u(t) \quad (3)$$

본 논문에서는 Table 2와 같은 특성을 가진 진동력 발전 장치 모델 Fig. 3을 이용하여 이론적 발전량과 모델의 발전량을 통하여 얻어진 데이터를 분석하였다.

Table 2 Physical Characteristics of Neodymium Magnet and Generating Model

Mass	0.75kg	Curie Temperature	310~370°C
Spring Constant	214.28N/m	Maximum Operating Temperature	80~180°C
Natural Frequency(Hz)	2.67Hz	Resistivity	160μΩ·cm
Damping Ratio	2.78%	Hardness	560~580Hv
Natural Period	0.375Sec	Destiny	7.4g/cm <sup>3</sup>
Height	0.2m	temperature Coefficient of Br	-0.12~-0.10%/°C
Generating Model Diameter	0.1m	Temperature Coefficient of iHc	-0.6%/°C

위의 발전장치 설치 위치선정은 Table 3 열차의 각 요소에서 발생하는 주파수 특성(환경진단연구원, 기술자료)을 참고하였다. 차축과 궤도 노반 지반 중 가속도 응답이 큰 곳은 차축의 차륜과 궤도 부분의 레일, 침목, 도상이다. 이중 안전성 문제와 내구성, 효율성을 고려하여 보았을때 도상 위의 침목에 설치하여 실험을 진행하였다.

### 3. 실험 및 분석

#### 3.1 가속도 응답 및 기전력 량 분석

지하철 2호선 서초~방배 구간은 기존 자갈 도상에서 콘크리트 도상으로 변경하였다. 따라서 평균운행 시속 60km/h의 동일 구간에서 두 종류 도상 간의 비교가 가능하였다. 하지만 전동차가 동일 구간이지만 신호에 따른 속도 변화와 승객 여부 및 교행운행에 따른 변수는 무시하였다.

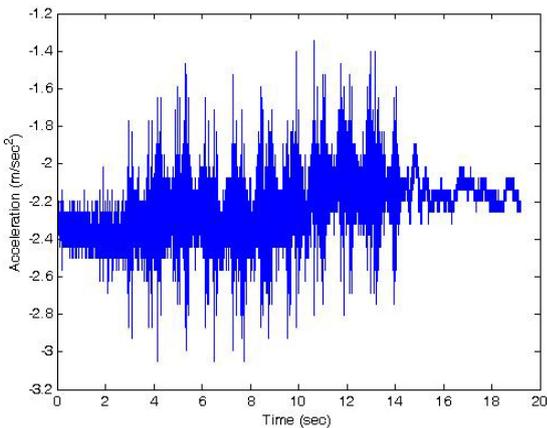


Fig. 6 Acceleration Response of Sleeper tie on Ballast Bed

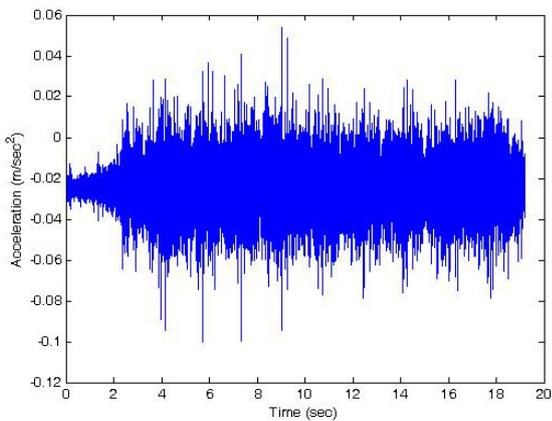


Fig. 7 Acceleration Response of Sleeper tie on Concrete Bed

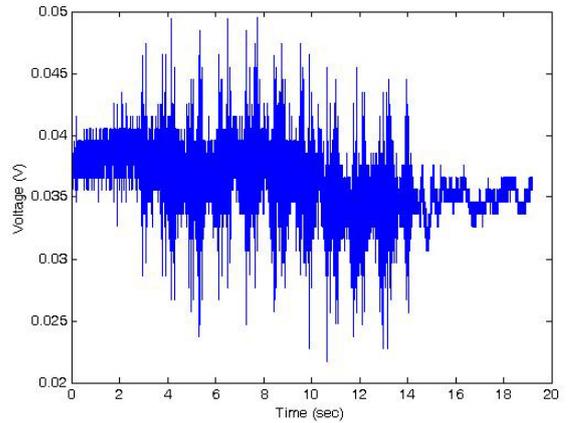


Fig. 8 Electromotive Force of Vibration Power Generator Set on Sleeper tie of Ballast Bed

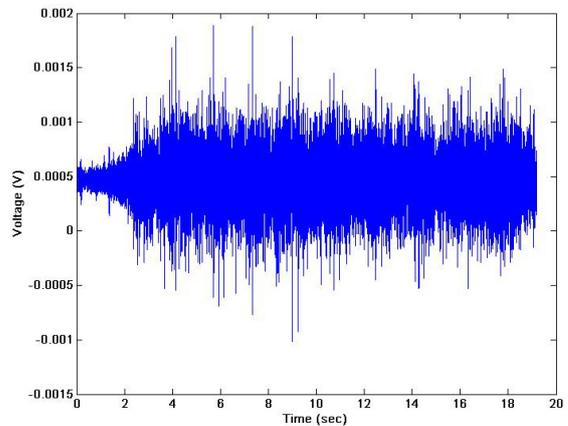


Fig. 9 Electromotive Force of Vibration Power Generator Set on Sleeper tie of Concrete Bed

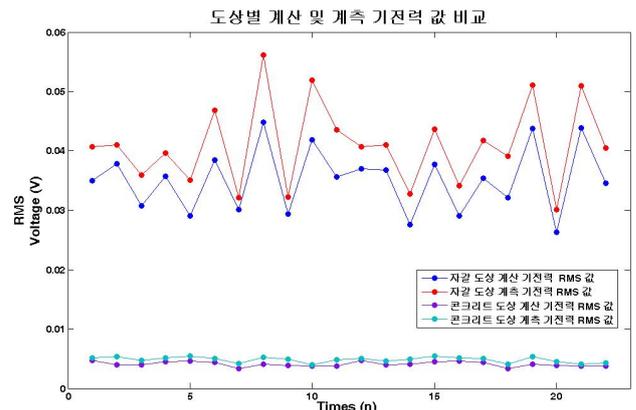


Fig. 10 Compare with Calculate the EMF and Survey the EMF each bed

위 그림과 같이 자갈 도상과 콘크리트 도상의 가속도 응답을 보면 자갈 도상이 콘크리트 도상보다 더 크다는 것을 알 수 있다.

이는 자갈 도상이 콘크리트 도상보다 진동 상피가 크며 콘

**Table 4** Specification of train

Classification	Line 2 Chopper Control	Line 2. VVVF Inverter Control
Electric Power	DC 1,500 V	DC 1,500V
Capacity (People)	Tc : 148 (48 seat) M : 160 (54 seat)	Tc : 148 (48 seat) M : 160 (54 seat)
Dead load	MC : 41.5t M1 : 41.5t M2 : 32.0t	TC : 33.0t M1 : 34.8t M2 : 41.8t 10 cars : 343t
Loading Condition	Performance criteria : 20t/car Strength criteria : 30t/car	Performance criteria : 20t/car Strength criteria : 30t/car

EL- 표준 할 하 증  
전동차 전동선인 경우 선로 등급에 상관 없이 EL-18

콘크리트 도상의 경우 탄성체결 장치 등 별도의 완충 장치를 통해 진동을 상쇠시키므로 가속도 응답이 작다. 따라서 Fig. 10과 같이 발생하는 기전력 값은 자갈 도상이 콘크리트 도상보다 약 10배 이상 크다는 것을 알 수 있다.

본 실험에서는 콘크리트 도상과 자갈 도상의 침묵에서 가속도 응답 및 발전 장치 기전력을 각 22회 계측을 하였다. 지하철 2호선 서초~방배 구간의 평균시속 60km/h의 열차 운행시 측정을 하였다. 자갈 도상의 평균적 거동은 -0.3g~0.2g, 콘크리트 도상의 평균적 거동은 -0.04g~0.02g로 계측되었다. 계측된 가속도 응답을 매트랩을 이용하여 식 (3)을 적용시켜 거동에 따른 계산된 기전력 량을 구하였다.

### 3.2 베이저안 회귀 및 상관 분석

식 (3)에서 보듯이 진동발전 장치 특성 및 독립변수 가속도 응답에 따라 기전력 값의 크기가 비례하지만, 계측 시 터널 안의 소음 및 변수로 인해 계산 기전력 값과 오차가 있다. 이상적으로 기전력에 영향을 미치는 독립변수 모두를 모델에 포함시킬 수 있으면 Random error가 없이 정확한 함수 관계가 성립할 수 있겠으나 현실적으로 불가능하다. 따라서 수직 가속도 응답에 대한 터널 내 지하철 운행으로 발생 기전력 량을 예상하고자, 계산 기전력 값을 하나의 독립변수로 가정하고, 소음 및 여러 변수를 포함한 계측 기전력 값과의 회귀 및 상관 분석을 하였다.

위 철도운행으로 인한 거동으로 발생하는 전압을 보면 자갈 도상에서 계산 기전력 량의 평균은 35mV이고, 관측 기

전력 량의 평균은 41mV가 나왔다. 콘크리트 도상 역시 계산 기전력 량의 평균은 4.1mV이며, 관측 기전력 량의 평균은 4.8mV로 계측이 되었다. 이 결과 계산된 침하량 X에 대한 관측된 침하량 Y의 회귀를 수행할 수 있으며, 그 결과를 요약 제시하였다. 데이터로부터 표본 표준 편차는 자갈 도상에서 계산 기전력 5.43mV, 계측 기전력 6.15mV이며, 콘크리트 도상에서는 계산 기전력 0.417mV, 계측 기전력 0.418mV이다. 여기서 최소 자승법으로부터 얻어지는 식 (4)와 식 (5)을 이용하여  $\hat{\alpha}$ 와  $\hat{\beta}$ 의 최소자승 추정치를 구할 수 있다.

$$\hat{\alpha} = \frac{1}{n} \sum y_i - \frac{\beta}{n} \sum x_i = \bar{y} - \hat{\beta} \bar{x} \tag{4}$$

$$\hat{\beta} = \frac{\sum x_i y_i - n \bar{x} \bar{y}}{\sum x_i^2 - n \bar{x}^2} \tag{5}$$

X(계산 기전력)에 대한 Y(관측 기전력)의 선형 회귀식은 다음과 같다. 자갈 도상에서의 선형 회귀식은  $E(Y|X=x) = 1.1308x + 0.0013$ 이고, 콘크리트에서의 선형 회귀식은  $E(Y|X=x) = 0.9585x + 0.0009$ 로 나타낼 수 있다.

Fig. 11과 Fig. 12는 주어진 데이터화 선형 회귀식을 도해적으로 나타내었다.

$$\hat{p}_{XY} = \frac{1}{n-1} \frac{\sum_{i=1}^n x_i y_i - n \bar{x} \bar{y}}{S_X S_Y} \tag{6}$$

식 (6)을 이용하여 관측 기전력 량과 계산 기전력 량의 상관계수를 구하면 자갈 도상에서는 0.997, 콘크리트 도상에서는 0.957이라는 높은 상관계수를 얻는다.

$$\begin{aligned} < \mu_{Y|x} >_{1-\alpha} \\ = \bar{y}_i \pm t_{(1-\frac{\alpha}{2}, n-2)} \cdot s_{Y|x} \sqrt{\frac{1}{n} + \frac{(x_i - \bar{x})^2}{\sum (x_i - \bar{x})^2}} \end{aligned} \tag{7}$$

식 (7)을 이용하여 선정된 N값으로 95% 신뢰구간을 구성할 수 있다. t- 분포의 신뢰수준 임계치(Critical values)에서 자갈 도상은  $t_{0.99, 20} = 3.5518$ , 콘크리트 도상은  $t_{0.95, 20} = 1.7247$ 이다(Alfredo *et al.*, 2007). 이를 식 (7)에 대입한 값 중에 X의 평균값  $x_i = \bar{x}$ 에서 그 구간이 최소가 되게 된 회귀선을 따라 이 점들을 연결하면 회귀식의 적절한 신뢰구간을 얻어 Fig. 7과 8의 선형 회귀식 아래와 위 점선으로 표시했다.

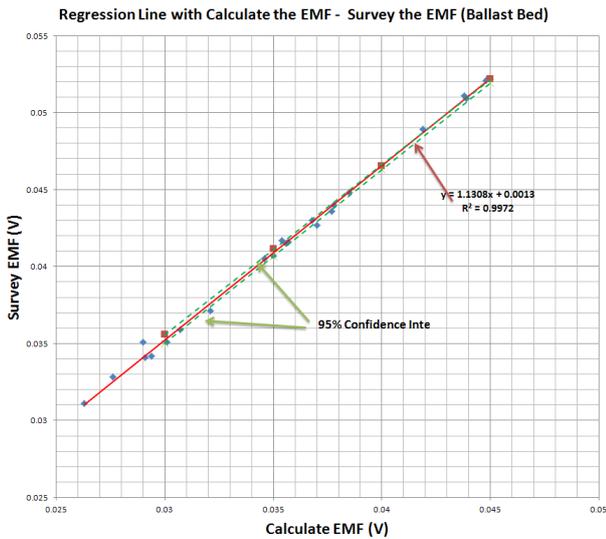


Fig. 11 Regression Line with Calculate the EMF-Survey the EMF(Ballast Bed)

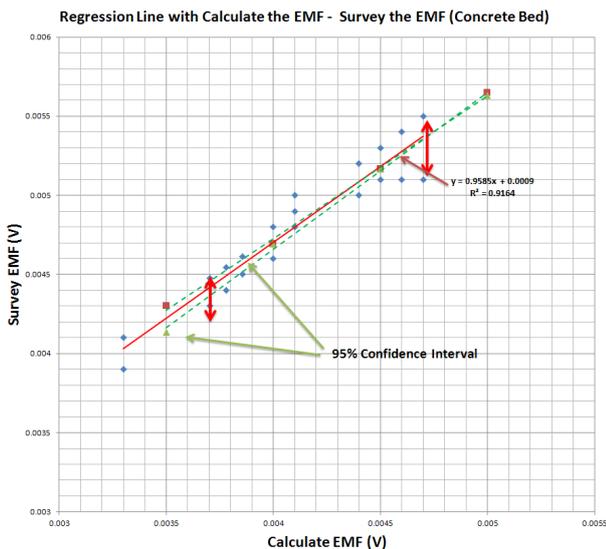


Fig. 12 Regression Line with Calculate the EMF-Survey the EMF(Concrete Bed)

베이지안 접근법에 따라서  $\alpha, \beta, \sigma^2, E(Y|x)$ 를 랜덤 변량으로 고려하여, 무작위 표본표출 오차에 기인하는 인식적 불확실성은 확률적 분석으로 직접 통합될 수 있다. 모수들의 가정된 사전 분포와 이 우도함수를 결합하면, 모수들의 갱신된 분포는 다음 식 (10)과 같다.

$$f''(\alpha, \beta, \sigma^2) = kL(\alpha, \beta, \sigma^2)f'(\alpha, \beta, \sigma^2) \quad (8)$$

데이터베이스 추정의 경우에 대한 결과는 다음 식 (9), (10)와 같으며, 추정된 통계치로부터  $\alpha, \beta, \sigma^2$ 는 추정되며 회귀선의 인식적 불확실성은  $(x - \bar{x})^2/s_x^2$ 으로 추정되는 외삽

의 정도와 회귀선 도출에 사용한 데이터 점의 수에 의존한다.

$$E(\theta_x) = \alpha + \beta x \quad (9)$$

$$Var(\theta_x) = \frac{n-1}{n-3} \left[ \frac{1}{n} \left[ 1 + \frac{n}{n-1} \frac{(x - \bar{x})^2}{s_x^2} \right] \right] \sigma^2 \quad (10)$$

계산 기전력 량과 관측 기전력 량의 두 랜덤 변량  $X, Y$  상관계수는  $\rho$ 에 의해 측정되며  $X, Y$ 의 평균과 분산을 위의 데이터를 통해 안다고 가정했을 때, 베이지안 업데이트 방정식을 사용해서 상관계수의 분포는 다음 식 (11)과 같이 갱신된다.

$$f''(\rho) = kL(\rho)f'(\rho) \quad (11)$$

위의 베이지안 회귀분석과 상관도 분석을 통하여 기존 식 (3)은 다음 식 (12), (13)로 갱신이 되었다.

자갈 도상

$$\epsilon(t) = -1.1308nB(2\pi r) \frac{d}{dt}u(t) + 0.0013 \quad (12)$$

콘크리트 도상

$$\epsilon(t) = -0.9585nB(2\pi r) \frac{d}{dt}u(t) + 0.0009 \quad (13)$$

식 (12), (13)의 갱신된 식으로 구한 기전력 량과 관측값의 차이를 보면 Fig. 13~16과 같이 차이가 줄어든 것을 볼 수 있다.

페리데이 법칙을 이용한 식 (3)에서 자속밀도와 코일 권수, 수직 운동속도와 비례하지만 실제 모델에서 코일의 권수와 스프링과 Nd 자석의 연결상태, 그리고 실제 열차운행시 수직하중 운동만 있는 것이 아니라 그 외 환경적 변수에 의해 모델과 식의 기전력 계산 값이 차이가 있다.

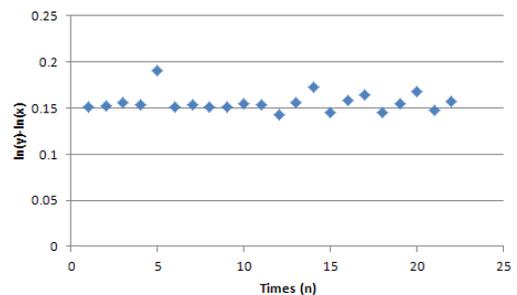


Fig. 13 Before updating, Differences with Calculate the EMF - Survey the EMF(Ballast Bed)

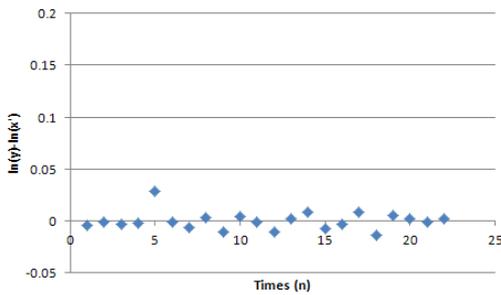


Fig. 14 After updating, Differences with Calculate the EMF - Survey the EMF(Ballast Bed)

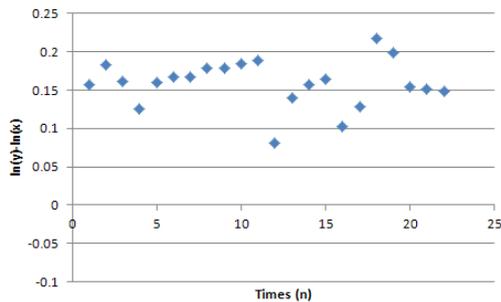


Fig. 15 Before updating, Differences with Calculate the EMF - Survey the EMF(Concrete Bed)

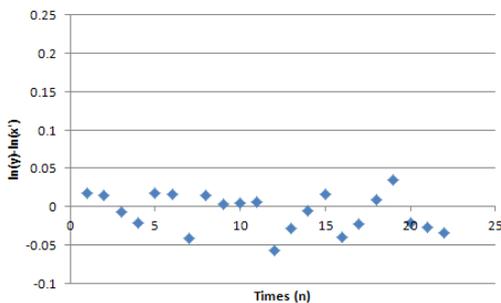


Fig. 16 After updating, Differences with Calculate the EMF - Survey the EMF(Concrete Bed)

### 3. 결 론

수정된 모델식을 다이오드 정류회로를 거쳐 발전 장치의 교류전류가 직류 전류로 변환되고 Capacitor(100mV-63V)에 충전이 이루어진다고 가정했을 시 발생하는 기전력 량을 구해 보았다. 침목과 침목사이 간격은 약 65cm이고, 서초~방배 구간의 연장은 약 1.8km, 상·하행 침목 양 끝에 설치 가정 시 얻을 수 있는 전력량을 보면 Table 5와 같이 전력을 얻을 수 있다.

일반적으로 전기 이용에 따른 이산화탄소 배출량 계산 공식에 따르면 전력 1KWh 생산 시 발생하는 이산화탄소량은 0.425kg이다(Korea Energy Management Co., 2008).

Table 5 Electromotive force analysis

	Voltage RMS (mV)	Electric Power (W·sec)	Electric Energy (MW·h)
Ballast Bed	40mV	0.8	10.36
Concrete Bed	4mV	0.08	1.036

Table 5에서 같이 침목 양쪽에 진동발전 장치를 설치하였을 때 열차 1대 운행 시 얻을 수 있는 기전력 량을 이산화탄소 저감량으로 환산 했을 때 1km당 자갈 도상에서 약 2.4t, 콘크리트 도상에서 약 0.24t의 저감효과를 기대할 수 있다.

본 논문은 페리데이 법칙을 이용하여 발전 장치모델을 철도에 적용하고, 베이지안 접근을 이용한 회귀 상관분석을 통하여 모델 자갈도상과 콘크리트 도상 별로 유도 기전력 모델을 수정하였다. 수정된 식을 이용하여 서초~ 방배구간의 전력량을 구하였다. 소음 및 각종 변수로 인해 계산 기전력 값과 오차가 발생하였으나 회귀 분석을 통해 기전력을 예상할 수 있게 모델식을 수정하였으며, 침목 내부에 설치를 하게 된다면 내구성 확보와 효율적인 전력 회수가 될 것으로 기대된다. 진동력 발전 장치는 자속 밀도 및 코일 횡수와 비례하고 열차 운행속도에 따라 가속도 응답이 커지므로 향후 고속철도 적용 및 효과적인 발전장치 모델개발과 효율적인 축전에 관한 지속적인 연구가 필요하다.

### 참 고 문 헌

Alfredo H-s, A., Wilson H.T. (2007) Probability Concepts in Engineering, Wiley, 2nd Edition.

Choi, E.S., Chin, W.J. (2006) Diminution of Bridge Vibration for High-Speed Trains, *Korean Society of Railway*, 9(1), pp.125~130.

Jo, B.W., Lee, Y.S. (2010) A Basic Experimental Study on Green-Bridge Vibration Power Generation using Bridge Vibration, *Korean Society of Road Engineers*, 12(4), pp.121~129.

Kim, J.H., Lee, J.Y. (2011), A Feasibility Study on the Energy Harvesting Technology for the Real-Time Monitoring System of Intelligent Railroad Vehicles, *Korean Society of Mechanical Engineers*, 35(9), pp.955~960.

Korea Energy Management Corporation (2008) Korea Energy Management Corporation Green Project, *Korea Energy Management Corporation*.

Kwon, S.D., Lee, H.K. (2011) Piezoelectric Energy Harvesting from Bridge Vibrations under Railway Loads, *Korean Society of Civil Engineers*, 31(4), pp.287~293.

- Min, R.K., Sung, D.Y.** (2012) Analysis of Dynamic Behavior of Railway Bridge with Concrete Track, *Korean Society of Railway*, 15(21), pp.147~153.
- Song, J.H., Kang, W.H.** (2010), Probabilistic Shear Strength Models for Reinforced Concrete Beams Without Shear Reinforcement, *Structural Engineering and Mechanics*, 34(1), pp.15~38.
- Stephen, N.G.** (2006), On Energy Harvesting from Ambient Vibration, *Journal of Sound and Vibration*, 293, pp.409~42.
- Williams, C.B., Yates, R.B.** (1996) Analysis of a Micro-electric Generator for Microsystems, *Sensor and Actuators. A physical*, 52, No.1~3.
- Yu, B.G.** (2008) Energy Harvesting Technology by Using MEMS, *Electronics and Telecommunications Trends, ETRI*, 23(6), pp.48~57.

---

## 요 지

본 논문에서는 페러데이 법칙을 이용한 진동발전 장치를 지하철의 자갈도상과 콘크리트 도상의 분류에 따른 기전력량을 분석하였다. 지하철 2호선 서초~방배 구간의 자갈도상에서 콘크리트 도상 변경으로 동일한 진동차 운행속도로 동일 구간에서 차량운행에 의한 동특성을 분석하고 진동발전 장치를 이용해 얻어질 수 있는 기전력량을 분석하였다. 또한 페러데이의 법칙에 의한 유도 기전력 식에 의한 계산 기전력량과 발전 장치에 의한 관측 기전력량을 베이지안 회귀 분석 및 상관분석을 통하여 철도에 적용되는 모델에 대한 신뢰구간과 모델식을 각 도상별로 업데이트하였다. 수정된 식을 이용한 기전력은 한 개의 진동발전 장치 당 콘크리트 도상에서 4mV, 자갈도상에서는 40mV의 전력을 얻을 수 있다.

**핵심용어** : 에너지하베스팅, 동특성, 베이지안 회귀분석, 유도 기전력