

녹색사회기반시설의 소음에너지 하베스팅을 위한 기초실험 연구

A Basic Experimental Study on Noise Energy Harvesting for Green Infrastructure

조 병 완† 김 현 식* 김 경 태* 윤 광 원**
Jo, Byung-Wan Kim, Hyunsik Kim, Kyung-Tae Yoon, Kwang-Won

요 지

지구온난화 증가에 따른 교토협약으로 전 세계적으로 녹색 신·재생에너지에 대한 관심이 증가하고 있다. 본 논문에서는 철도, 도로, 지하철 등 터널 내에서 상상을 초월하는 차량의 진동·소음으로 인한 소모에너지를 음력 발전을 통하여 에너지를 하베스팅 하는 녹색사회기반시설 시스템을 구축하기 위해 전자기유도를 활용한 자체적인 소음발전 디바이스를 적용하여 실제 사회기반시설의 종류별 소음특성에 따른 소음발전 디바이스의 적용성 및 효율성을 분석하였다. 실험결과 소음발전 디바이스는 특정 진동수의 소음에서 최대 전압 및 전력을 나타냈으며, 소음원으로부터의 거리 및 소음의 음압에 따라 발생하는 전압 및 전력이 특정한 관계를 가진다는 사실을 확인하였다. 이러한 실험결과들을 통해 향후 건설되는 녹색사회기반 시설에 적용될 소음발전 디바이스의 개발 방향을 모색하였다.

핵심용어 : 소음에너지, 에너지 하베스팅, 소음발전 디바이스, 녹색사회기반시설

Abstract

In this study we propose noise energy harvesting for green infrastructure development. In this regard, infrastructures such as railroad, subway, and road are taken into consideration as sources of noise which provides energy through certain wave forms. As the need of recycling noise energy became reasonable due to the increase of infrastructure usage, the capacity and property of our noise energy generating device, which uses electromagnetic induction for electricity generation, are analysed in this paper. Consequently, the outcomes of this experiment show the fact that maximum electricity is generated from the device at a specific point of noise frequency, and the relation between air pressure caused by noise and the electricity generated by the device is in a specific proportional form either linear or non-linear. The major points of developing noise energy generating device in order to apply it into social infrastructure are discussed in this paper as well.

Keywords : noise energy, energy harvesting, noise energy generating device, green infrastructure

1. 서 론

국제적으로 기후변화에 대한 우려의 움직임이 이루어지고 있는 가운데 기후변화에 대응하는 방법으로 방재 혹은 온난화가스 직접적인 저감의 두 가지 방법이 이루어지고 있다. 특히 외국 선진국가들은 신·재생에너지의 활용을 통한 온난화가스 저감 기술 개발을 선도적으로 진행하고 있으며, 녹색 성장을 위한 국제 외교적 정책이 활발하게 추진되고 있는 가운데 국내에서도 녹색사업을 위한 투자가 대대적으로 이루어

지고 있고, 향후 국가 R&D과제 예산으로 2012년까지 현재의 2배에 해당하는 규모로 증대한다는 계획을 가지고 있다 (박준홍, 2009).

또한, 정부 차원에서 미래의 고부가가치로서 무한한 가능성을 가진 태양광, 풍력, 지열, 바이오, 폐기물, 수소연료전지 등 11개 분야의 「신에너지 및 재생에너지 이용, 개발, 보급 촉진법」 제정을 통하여 CO₂를 배출하는 화석연료를 대체하는 산업에 많은 노력을 기울이고 있다. 이에 맞맞추어 우리 주변의 생활환경에서 발생하고 버려지고 있는 소모적 에

† 책임저자, 중신회원 · 한양대학교 토목공학과 교수
Tel: 011-290-0327 ; Fax: 02-2292-0321
E-mail: joycon@hanmail.net

* 한양대학교 토목공학과 석사과정

** 학생회원 · 한양대학교 토목공학과 박사과정

• 이 논문에 대한 토론을 2010년 12월 31일까지 본 학회에 보내주시면 2011년 2월호에 그 결과를 게재하겠습니다.

너지원을 활용하기 위한 에너지 하베스팅에 대한 노력이 절실히 요구되고 있다.

따라서 본 논문에서는 급격한 경제발전으로 승용차, 기차, 비행기 등 교통수단의 증가에 따라 도시에서 발생하는 교통 소음, 건설현장 소음, 산업체 소음, 생활 소음으로부터 에너지 회수 기술을 연구하기 위해 교통 관련 소음 발생 시설물의 소음·진동 에너지를 전기에너지로 전환하는 에너지 하베스팅의 인자로서 소음의 음압 및 진동수에 따른 전압 및 전력 생산의 변화와 사회기반시설물 별 소음 특성 및 소음에너지 하베스팅 적용성을 분석하여 도로, 철도, 공항, 터널 시설물 같은 녹색사회기반시설을 위한 소음에너지 하베스팅의 기초 연구를 수행하고자 하였다.

2. 사회기반시설의 소음 특성

우리 생활주변에는 항상 소음이 발생하며, 소음 발생의 원인 및 소음 발생 주변 환경에 의해 저마다의 특성을 지니게 된다. 해외뿐만 아니라 국내에서도 사회기반시설물에 따른 소음 특성에 관한 연구들이 활발히 진행되고 있는 가운데, 소음 발생원에 따라 소음의 진동수가 특징적으로 나타난다는 것에 대한 조사 결과들이 나오고 있다(정경원 등, 2006; 김재철 등, 2001; 박준철 등, 2008). 이렇게 사회기반시설에서의 소음발생은 항상 일어나며, 이러한 소음으로 인한 피해를 줄이기 위한 연구 및 소음 특성에 관한 연구는 활발하게 진행되고 있는 가운데 이러한 연구 자료들을 이용하여 필연적으로 발생하는 소음에너지를 직접 이용하기 위한 연구는 국내뿐만 아니라 해외에서도 미미한 실정이다. Table 1에서는 지하철, 도로, 그리고 KTX에서의 소음 진동수 특성을 보여주고 있다.

이러한 소음 진동수 특성 분석은 소음에너지의 효율적인 수집을 위해 매우 중요하게 적용된다. 각각의 시설물 소음은 특정 진동수에서 최고 음압을 나타내는데, 이는 곧 해당 진동수 영역에서 가장 많은 소음에너지를 낸다는 것을 의미하

Table 1 Infrastructure Noise Property

	Noise Frequency Property
Subway	<ul style="list-style-type: none"> 차륜과 레일 사이의 진동소음 및 스킵소음 발생 소음 중심진동수 대역 - 스킵소음: 2~4kHz, 진동소음: 500Hz 지하철역 구조, 레일 곡선부, 차량의 속도 등의 영향에 따른 소음 특성 다변화
Road	도로로부터 5m 떨어진 지점에서 약 70km/h로 주행하는 승용차, 소형화물, 버스 및 대형트럭 소음의 중심진동수 대역 : 1kHz
KTX	<ul style="list-style-type: none"> 차량이 300km/h로 주행시 차량소음 중심진동수: 315Hz 레일 진동소음- 저속구간: 1000Hz, 고속구간: 1250Hz~4000Hz

며, 해당 진동수 영역에서 가장 효과적으로 전기를 생산할 수 있는 발전 장치를 적용함으로써 최대 효율을 기대할 수 있다.

또한, 철도나 도로의 터널내 소음은 터널내의 반사효과로 인해 직접음과 반사음이 합성되어 더욱 큰 음압을 나타내며(여운호 등, 1993), 터널내의 위치 및 구조에 따라 소음에너지 밀도 및 특성되는 진동수 대역이 상이하여 각각의 터널 구조물 소음 특성 분석을 통해 더욱 효과적인 에너지 하베스팅을 실시할 수 있다.

3. 소음에너지 하베스팅을 위한 소음발전 실험

3.1 소음발전의 원리

소리는 공기를 매질로 하여 파동의 형태로 전달되는 에너지의 한 형태로서, 파동의 진행이 매질의 진동 방향과 같은 방향으로 진행되는 형태인 종파(Longitudinal wave)의 형태를 가지며, 매질인 공기를 통해 생기는 음압(Sound pressure)에 의해 물리적 외력이 발생한다. 이러한 소리의 음압 특성을 이용하여 소리에너지를 진동판(Diaphragm)으로 전달하여 운동에너지로 변환이 가능하며, 변환된 운동에너지의 진동 특성을 이용하여 전기에너지로 변환이 가능하다.

본 연구에서는 소리에너지를 통해 생긴 운동에너지에서 전기에너지로 변환되는 과정에 진동판의 진동이 자석 주변의 유도코일을 상하로 진동시켜 자기장의 변화를 반복하여 전류를 유도하는 방법인 전자기유도(electromagnetic induction)를 이용하였으며, 이는 실제 무빙코일 마이크(Moving-coil microphone)에도 적용되고 있는 원리이다. Fig. 1에서는 본 실험에 사용된 소음발전 디바이스의 원리를 도식화하여 보여주고 있다.

Fig. 2와 Fig. 3의 진동판은 음파의 압력에 따라 움직일 수 있는 얇은 막으로 형성되며, 소리에너지를 운동에너지로 변환시켜주는 역할을 담당하게 되고, 이러한 진동판의 움직임에 따라 자석 주변에 둘러싸인 유도코일이 상하로 반복 운동을 하면서 코일 주변 자기장의 변화에 따라 유도전류가 형성된다. 형성된 유도전류는 교류의 형태를 가지며, 이를 향후 축전하기 위하여 교류를 직류로 바꿔주는 브릿지 회로(Bridge Circuit)를 이용하였다.

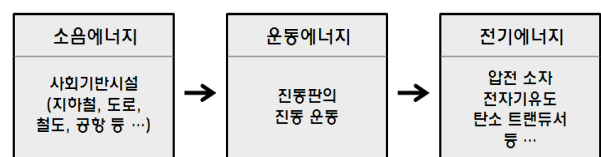


Fig. 1 Noise-Electricity Transferring Process

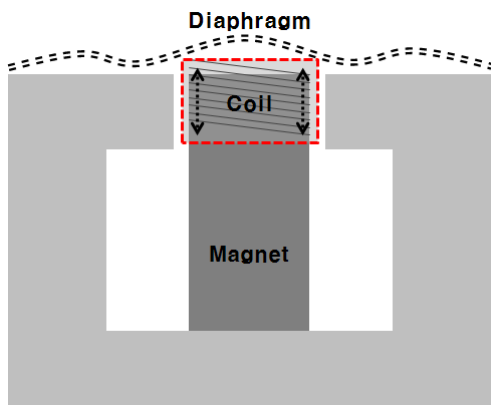


Fig. 2 Noise Energy Generating Device

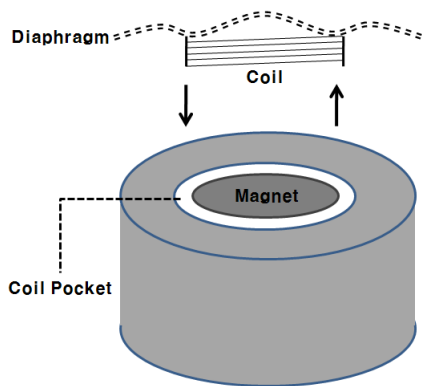


Fig. 3 Noise Energy Generating Device Structure

3.2 소음발전 디바이스의 성능 및 특성

본 연구에서는 소음에너지 실험을 위하여 국내 음향업체에서 제작한 Fig. 4, Fig. 5와 같은 2종류의 소음발전 디바이

Table 2 Noise Energy Generating Device Capacity

Type	Coil Diameter (mm)	Resistance (Ω)
Device #1 (Copper)	0.03	600 \pm 15%
Device #2 (Copper)	0.05	40 \pm 15%



Fig. 4 Device #1



Fig. 5 Device #2

스를 실험에 적용하였으며, 각각의 디바이스 내부에 적용된 코일의 직경을 달리하여 전자기유도에 중요한 영향을 미치는 저항값을 Table 2와 같이 차이를 두었다.

저항값은 코일의 직경뿐만 아니라 코일의 재질 및 길이에도 영향을 받는데, 본 실험의 #2디바이스는 #1디바이스에 비해 코일직경을 굵게 하였으며, 코일의 감은 횟수를 줄여 저항값을 줄이는 것에 초점을 맞추었다. 또한, 코일의 감은 횟수를 적게 함으로써 얇은 막으로 형성된 진동판에 적은 크기의 코일 무게를 가하여 작은 소음에도 진동판이 민감하게 반응할 수 있도록 실내실험에 적합하게 제작하였다.

3.3 소음에너지 발전 실험 방법

본 실험에서는 소음발전 디바이스를 이용하여 진동수와 음압에 따른 전압 및 전력의 변화를 측정 분석하였다. 실험은 Fig. 6과 같이 실험실에서 스피커의 진동판과 소음발전 디바이스의 진동판 사이의 간격을 조절하여 멀티미터기를 통해 수집되는 데이터를 기록하는 방법으로 진행하였다.



Fig. 6 Noise Energy Experiment

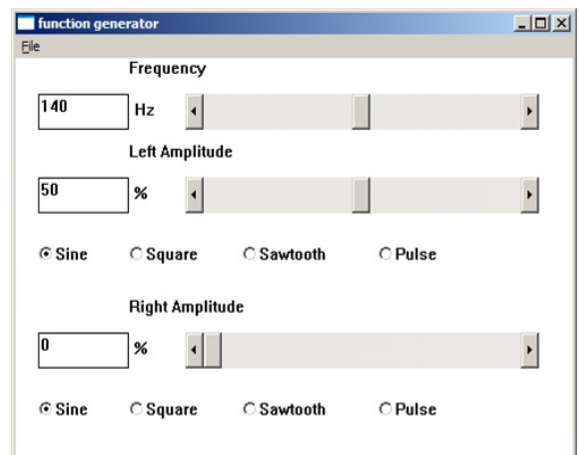


Fig. 7 Function Generator

첫 번째 실험은 Fig. 7의 함수생성기(Function Generator)를 이용하여 소음의 진동수 변화에 따른 전압 및 전력의 변화를 측정하였으며, 스피커 진동판으로부터 10cm의 일정한 거리에서 진동수 70~220Hz의 범위 내의 저주파 대역에서 2Hz단위로 진동수를 증가시키면서 측정을 실시하였다. 실제 사회기반시설물의 일반적 소음 진동수 대역이 아닌 70~220Hz의 범위로 측정한 이유는 본 연구에서 사용한 디바이스가 해당 진동수 대역에서 효과적인 전압 및 전력값을 나타냈기 때문이다. 실제 사회기반시설물의 소음 진동수에 적합한 디바이스에 대한 연구가 추후에 요망되는 점이다. 두 번째 실험은 일정 진동수 및 일정 음압의 소음 하에 소음원으로부터의 거리에 따른 소음에너지 전압 및 전력을 측정하였으며, 세 번째 실험에서는 음압의 변화에 따른 전압 및 전력을 측정하여 그 관계에 대해 분석을 하였다.

4. 소음에너지 발전 실험 결과 및 분석

4.1 소음 진동수에 따른 전기값

소리는 기본적으로 진동수와 음압에 따라 에너지 특성이 결정되며, 진동수는 헤르츠(Hz)의 단위로 표현하고 음압레벨은 데시벨(dB) 혹은 일상에서 흔히 소리의 크기를 나타낼 때 쓰이는 볼륨(Volume)으로 표현이 될 수 있다. 소리에너지가 전기에너지로 변환 된 이후에는 소리 특성이 전기 특성으로 변환이 되며, 이러한 전기적 특성으로는 전압(V), 전류(I), 저항(R) 그리고 전력(W) 등이 있는데, 이러한 전기적 특성들은 아래와 같이 서로의 관계식을 가지고 있다.

$$W=IV, I=\frac{V}{R}, W=\frac{V^2}{R} \quad (1)$$

전압, 전류, 저항 그리고 전력은 일반적으로 각각 볼트(V), 암페어(A), 옴(Ω) 그리고 와트(W)의 단위를 사용한다.

사회기반시설물의 종류 및 장소에 따라 발생하는 소음의 주요 진동수가 다르다는 가정 하에 본 실험에 사용한 두 개의 소음발전 디바이스의 진동수 특징을 분석한 결과 Fig. 8과 Fig. 9에서 볼 수 있듯이 두 개의 디바이스가 최대 전압 및 전력을 생산하는 특정 진동수가 있음을 알 수 있었다. 이러한 특정 진동수에서 최대 전압값이 나오는 이유는 해당 진동수에서 디바이스 내의 진동판이 최대 진동을 하기 때문이며, 이때의 해당 진동수를 소음발전 디바이스의 고유진동수(Proper Frequency)라고 부른다. 고유진동수는 소음발전 디바이스 내의 진동판의 두께, 재질, 크기, 모양 등의 특징에

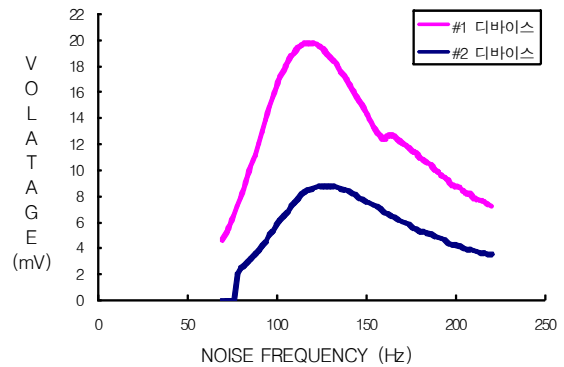


Fig. 8 Voltage Generation According to Noise Frequency

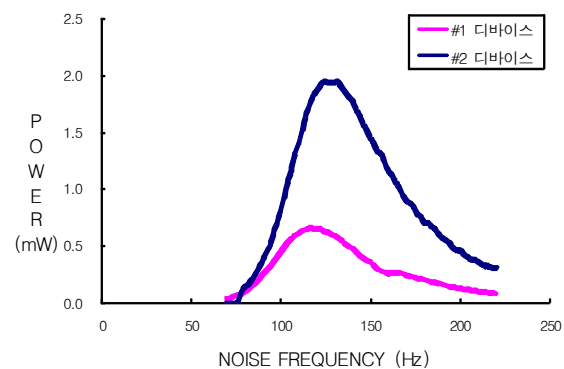


Fig. 9 Power Generation According to Noise Frequency

Table 3 Generated Voltage of Device#1 at 110~140Hz

Frequency (Hz)	Voltage (mV)	Ohm (Ω)	Power (mW)
110	19.1	593.8	0.61437
112	19.4	593.8	0.63382
114	19.6	593.8	0.64695
116	19.8	593.8	0.66022
118	19.8	593.8	0.66022
120	19.8	593.8	0.66022
122	19.7	593.8	0.65357
124	19.5	593.8	0.64037
126	19.3	593.8	0.62730
128	19.0	593.8	0.60795
130	18.7	593.8	0.58890
132	18.4	593.8	0.57016
134	18.1	593.8	0.55172
136	17.6	593.8	0.52166
138	17.2	593.8	0.49821
140	16.8	593.8	0.47531

따라 변하며, 진동판의 특징을 변화시킴으로써 임의의 특정 진동수에서 최대 전압 및 전력을 만들어 낼 수 있다.

이는 철도나 지하철 터널 등 사회기반시설물에 소음발전 디바이스를 적용할 때 각 시설물 소음의 진동수 특성에 맞게 디바이스의 고유진동수를 설정하여 제작함으로써 에너지 하

Table 4 Generated Power of Device#2 at 110~140Hz

Frequency (Hz)	Voltage (mV)	Ohm(Ω)	Power (mW)
110	7.5	39.9	1.40977
112	7.8	39.9	1.52481
114	8.1	39.9	1.64436
116	8.3	39.9	1.72657
118	8.5	39.9	1.81078
120	8.6	39.9	1.85363
122	8.7	39.9	1.89699
124	8.8	39.9	1.94085
126	8.8	39.9	1.94085
128	8.8	39.9	1.94085
130	8.8	39.9	1.94085
132	8.8	39.9	1.94085
134	8.7	39.9	1.89699
136	8.6	39.9	1.85363
138	8.5	39.9	1.81078
140	8.4	39.9	1.76842

베스팅의 효율을 더욱 극대화할 수 있다는 것을 의미한다.

실험결과 중 전압 및 전력의 최대값(Peak)이 발생한 110~140Hz대역에서의 결과값들을 Table 3과 Table 4와 같이 나타냈다. 두 개의 표를 통해 #1디바이스는 118Hz 그리고 #2디바이스는 128Hz정도에서 최대 전압 및 전력을 만들어내는 것을 확인할 수 있으며, 실제 사회기반시설물의 주요 진동수 대역에 부합하는 소음에너지를 하베스팅하기 위해서는 디바이스의 고유진동수 보완이 필요하다.

4.2 소음원 거리에 따른 전기값

본 실험에서 스피커를 소음원으로 가정하여 실험을 진행하였고, 소음원에서부터 소음발전 디바이스까지의 거리는 각각의 진동판 사이의 거리로 지정하여 측정하였으며, 진동수에 따른 전압 및 전력 측정 실험에서 측정된 각 소음발전 디바이스의 고유진동수 소음을 이용하여 실험하였다. Fig. 10과 Fig. 11에서 볼 수 있듯이 소음원에서 멀어질수록 발생하는 전압과 전력이 비선형 형태로 감소한다는 것을 알 수 있었으며, 이는 소음이 전달되는 거리가 길어질수록 소음의 음파가 공기중에 분산(Diffusion)되어 소음발전 디바이스에 도달하는 소음의 음압이 낮아지기 때문이다. 실제로 사회기반시설물의 구조 및 지형 등의 외부 특성에 따라 소음의 특성이 변하게 되며, 이러한 변화에 따라 소음발전 디바이스의 적용성 또한 달라진다. 또한, 본 실험의 결과를 통해 사회기반시설물 소음원에 소음발전 디바이스를 적용할 때 더욱 효과적인 하베스팅을 하기 위해서는 소음원에 더욱 근접하게 디바이스를 적용해야 한다는 것을 유추해 볼 수 있다.

Table 5 Voltage Generation According to the Distance from Speaker Diaphragm

Distance(cm)	Device#1(mV)	Device#2(mV)
10	26.8	10.4
15	12.5	4.9
20	6.8	2.8
25	4.2	0
30	2.8	0
35	2.0	0

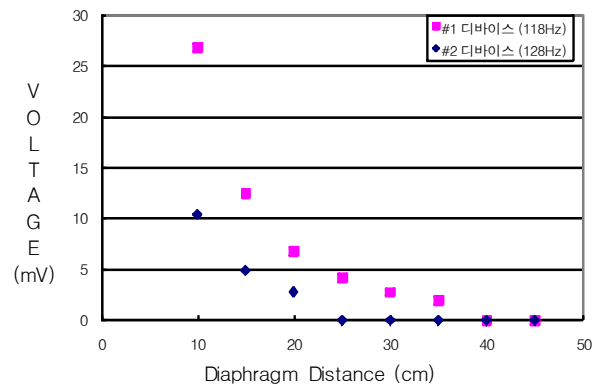


Fig. 10 Generated Voltage According to the Distance from Speaker Diaphragm

Table 6 Power Generation According to the Distance from Speaker Diaphragm

Distance(cm)	Device#1(mW)	Device#2(mW)
10	2.71078	1.20957
15	0.60175	0.26314
20	0.19649	0.07787
25	0.00000	0.02971
30	0.00000	0.01320
35	0.00000	0.00674

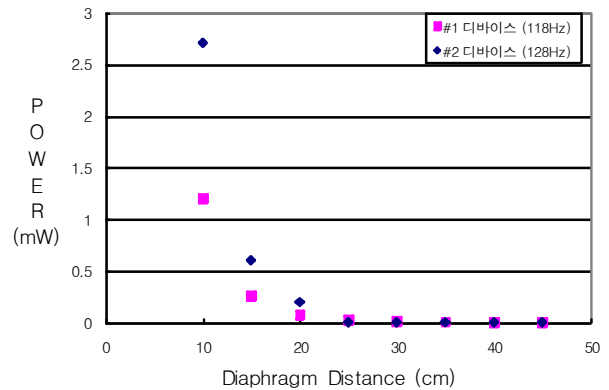


Fig. 11 Generated Power According to the Distance from Speaker Diaphragm

Table 7 Voltage Generation According to Volume

Volume(%)	Device#1(mV)	Device#2(mV)
5	2.9	0
10	5.6	2.3
15	8.3	3.3
20	11.0	4.3
25	13.7	5.4
30	16.4	6.4
35	19.0	7.4
40	21.7	8.4
45	24.3	9.4
50	26.8	10.4

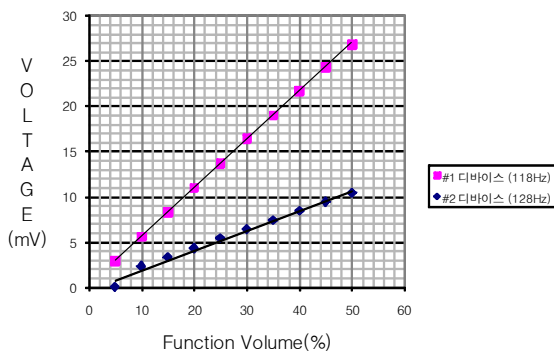


Fig. 12 Generated Voltage According to Volume

Table 8 Power Generation According to Volume

Volume(%)	Device#1(mW)	Device#2(mW)
5	0.01416	0.00000
10	0.05281	0.13258
15	0.11602	0.27293
20	0.20377	0.46341
25	0.31608	0.73083
30	0.45295	1.02657
35	0.60795	1.37243
40	0.79301	1.76842
45	0.99443	2.21454
50	1.20957	2.71078

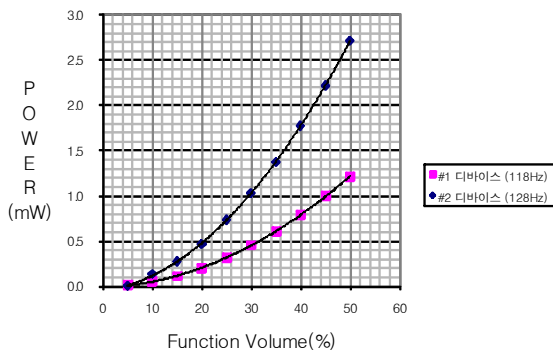


Fig. 13 Generated Power According to Volume

4.3 소음 음압에 따른 전기값

음압은 소음에너지의 크기를 결정하는 중요한 요소로써 음파를 전달하는 매질인 공기의 압력이 생겨 발생한다. 본 실험에 사용한 컴퓨터 및 스피커의 볼륨(음압)을 일정하게 유지한 상태에서 함수생성기(Function Generator)의 볼륨을 5%의 비율로 일정하게 50%까지 올리면서 실험한 결과 Fig. 12와 같이 볼륨의 증가에 따라 전압이 선형적으로 비례하여 증가한다는 것을 확인하였다. 또한, 전력은 전압의 제곱과 비례하기 때문에 볼륨의 증가에 따라 Fig. 13과 같이 2차 곡선의 형태로 증가한다는 것을 실험을 통해 확인할 수 있었다.

이러한 결과로 실제 사회기반시설물 소음의 크기를 나타내는 데시벨(dB)에 따라 소음발전 디바이스를 통해 나오는 전압 및 전력이 일정하게 증가 또는 감소할 것으로 예상할 수 있으며, 상대적으로 일반 소음보다 소음의 크기가 반사, 굴절, 증폭되는 터널 및 실내공간에서 더욱 효율적인 에너지 하베스팅이 가능하다는 것을 알 수 있다.

5. 결 론

본 연구에서는 사회기반시설에서 발생하는 소음특성을 분석하고, 자체적인 소음에너지 발전 디바이스를 이용한 전압 및 전력 생성 기초실험을 실시하여 녹색사회기반시설을 위한 소음에너지 발전 기술의 적용 가능성을 검증하고 효율적인 발전 방안에 대하여 모색해 보았다.

소음발전 기술은 기본적으로 소음 파동의 특성을 활용하여 전기를 생산하는 기술이며, 소음 에너지를 결정하는 가장 큰 두 개의 요소인 진동수와 음압이 발전에 지대한 영향을 준다는 것을 실험을 통해 증명하였다.

실험 수행결과 본 실험에 사용된 두 개의 소음발전 디바이스는 특정 진동수의 소음에서 최대 전기 생산효율을 발휘했으며, 이를 통해 소음발전 디바이스의 고유진동수를 사회기반시설물 소음의 진동수 특성에 따라 향후에 적합하도록 개발함으로써 더욱 효율적인 소음에너지 회수가 가능하다는 사실을 확인하였다. 또한, 소음원과 소음발전 디바이스의 거리에 따른 전기값이 비선형적 형태로 감소했으며, 소음의 음압 크기에 따른 발생 전압값은 선형적인 형태로 비례하였고 전력은 2차 곡선의 형태로 변하였다. 이러한 실험 결과 분석을 통해 실제 사회기반시설에 소음발전 디바이스를 적용할 경우 소음원으로부터의 거리 및 발생 소음의 진동수 특성 그리고 소음의 음압에 따라 에너지 회수 정도가 크게 달라질 수 있음을 알 수 있었다.

한편, 본 실험에 사용된 소음발전 디바이스를 사회기반시설

설에 직접 적용하기 위해서는 각각의 장소 및 시설물 소음에 최적화된 형태의 효율성 높은 소음발전 디바이스를 개발하기 위한 연구를 진행할 필요가 있으며, 사회기반시설의 종류에 따른 소음특성에 관한 관심이 필요할 것이다. 소음발전 디바이스의 효율성은 특정 소음 조건하에서의 생산 전력값의 크기에 따라 좌우되며 이는 소음발전 디바이스에 쓰이는 코일의 감은 횟수, 직경 및 자석의 강도 등에 따라 달라진다. 코일의 감은 횟수가 많아질수록 전압은 커지는 반면 저항도 증가하는 단점이 있으며, 직경이 커질수록 저항은 줄어든다. 이뿐만 아니라, 사용된 코일의 무게 또한 진동판의 진동수 특성에 영향을 미칠 수 있으므로 디바이스의 효율성 증대를 위해 복합적인 요소들에 대해 고려해야 한다.

저탄소 녹색성장의 시대가 열림으로써 청정에너지에 대한 세계 각국의 관심이 증대되고 있는 가운데 생활주변에서 쉽게 낭비되고 있는 소음에너지에 대한 연구가 필요하며, 소음발전 디바이스의 적용을 위해 성능향상 및 효율성 증대를 위한 노력이 요구된다.

참 고 문 헌

박준철, 김윤신, 강대준 (2008) 도로교통소음의 전파특성 및 영

향, 한국환경보건학회지, 34(4), pp.311 ~315.

정경원, 윤나나, 김주인, 광진, 김영태 (2006) 부산 지하철 2호선 소음 특성 연구, 한국환경과학회지, 15(3), pp.287 ~292.

서정석, 한경연, 이한진, 광광수, 김재수 (2004) 지형조건에 따른 도로교통소음의 변화 특성에 관한 연구, 대한환경공학회 2004 추계학술연구발표회 논문집, pp.591~599.

김재철, 구동희, 문경호 (2001) 한국형 고속철도의 소음/진동 특성에 관한 연구, 한국소음진동공학회 2001년도 춘계학술대회 논문집, pp.829~835.

여운호, 유명진 (1993) 터널 내부의 도로교통소음, 한국환경위생학회지, 19(4), pp.9~13.

박준홍 (2009) 저탄소 고효율 에너지-자원 회수를 위한 새로운 오펜수처리 시스템에 대한 제안과 새로운 도전, 대한토목학회지, 57(2), pp.43~47.

- 논문접수일 2010년 6월 1일
- 논문심사일 2010년 6월 17일
- 게재확정일 2010년 7월 14일