

## 웨이브테이블 신디사이징을 이용한 전기자동차 엔진 사운드 디자인

배준<sup>1</sup> · 김장영<sup>1\*</sup>

### Engine Sound Design for Electric Vehicle through Wavetable Software Synthesizer

June Bae<sup>1</sup> · Jangyoung Kim<sup>1\*</sup>

<sup>1</sup>\*Department of Computer Science, The University of Suwon, Hwaseong 18323, Korea

#### 요 약

전기자동차는 엔진 소음을 발생시키지 않는다. 엔진 소리가 없으면 보행자의 안전과 운전자의 주행 상태 인지에 문제를 가져온다. 이러한 문제를 피하기 위해 전기자동차 제조업체는 보통 샘플링 방식으로 엔진 소리를 녹음하여 재생하는 방식으로 엔진소리를 만들어 만든다. 그러나 샘플링 방식의 엔진 소리는 자연적인 엔진 소리를 만드는 것에 몇 가지 제한을 가진다. 이 문제를 극복하기 위해 우리는 소프트웨어 신디사이저를 이용하는 두 가지 방법을 연구했다. 그 둘은 감산형(subtractive)신디사이징과 웨이브테이블(wavetable) 신디사이징 방식으로 실제 엔진, 샘플링 방식, 감산형 방식과 비교한 결과 웨이브테이블 신디사이징 방식이 실제 엔진소리와 가장 유사함을 발견했다. 또한 데이터 사용과 제작비용에서 샘플링방식과 감산형 신디사이징 방식에 비해 유리함을 확인했다.

#### ABSTRACT

Unlike internal combustion engines, electric cars have little engine sound and very quiet, causing the following problems to occur. First of all, pedestrians are a threat to safety because they can't feel the car approaching. The driver is also unable to recognize how fast his car is driving at a certain speed. To solve these problems, electric cars should be artificially created and reused. This paper examines the problems of the Sampling engine sound currently being used and uses the engine sound to produce a sound engine sound for the solution. The sampling engine sound has some limitations in making natural engine sounds. To overcome this problem, we studied two methods of using software synthesizers. They found subtractive synthesizing and wavetable synthesizing, which compared wavetable synthesizing with actual engine, sampling and subtractive methods to find the most similar to real engine sound. We found that data usage and production cost are more advantageous than sampling method and subtractive syndication method.

**키워드** : 사운드디자인, 소프트웨어 신디사이저, 웨이브테이블, 전기차

**Key word** : Electric Vehicle, Software Synthesizer, Sound Design, Wavetable

Received 30 October 2018, Revised 7 November 2018, Accepted 14 November 2018

\* Corresponding Author Jangyoung Kim (E-mail: jykim77@suwon.ac.kr, Tel: +82-31-229-8345)

Department of Computer Science, The University of Suwon, Hwaseong 18323, Korea

Open Access <http://doi.org/10.6109/jkiice.2018.22.12.1639>

print ISSN: 2234-4772 online ISSN: 2288-4165

©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.  
Copyright © The Korea Institute of Information and Communication Engineering.

## I. 서론

일반 자동차와 달리 전기 자동차는 엔진 소리가 없다. 이는 보행자가 다가오는 자동차를 인식하기 어렵게 만들고 운전자가 자신의 차의 상태를 인지하는데 문제를 발생시킨다. [1] 우선 보행자들이 차가 다가오는 것을 느낄 수 없어 안전에 큰 위협이 된다. 또한 운전자는 자신의 자동차가 어느 정도 속도로 달리고 있는지 청각적으로 인식할 수 없게 된다. [2] 이러한 문제를 해결하기 위해 전기차는 소리가 없는 전기적 모터 장치를 보완하기 위해 인위적으로 엔진소리를 만들어 재생하여야 한다. [3]

과거에 전기 자동차를 위한 엔진 소리 설계에 대한 연구는 주로 샘플링 방식이거나 전통적인 감산형(subtractive) 신디사이징 방식에 대한 것이었다. 이러한 방식들은 자연스러운 엔진 소리를 만들어내기 힘들거나 제조시 비용이 많이 드는 단점이 있었다. 이 논문은 엔진 소리를 실시간으로 생성하는 새로운 접근 방식으로 웨이브테이블(wavetable) 신디사이징 방식을 연구한다.

2장에서는 기존 샘플링 방식에 대해 알아보고 그 한계점을 파악한다. 3장에서는 웨이브테이블 신디사이징 방식에 대해 알아보고 전기자동차 엔진 소리를 구현하는 알고리즘을 만든다. 4장에서는 각 시스템의 스펙트럼 분석과 비교를 통해 웨이브테이블 방식의 우수성을 증명한다.

분석방법은 엔진회전수 4,500RPM에서의 각 엔진 사운드를 스펙트럼 분석하여 각 주파수대 별로 엔진사운드의 주파수 볼륨을 비교하였다.

## II. 기존 연구와 현 전기자동차 엔진 소리 재생 방식

### 2.1. 전기자동차 엔진 소리 시스템

엔진소리가 없는 전기자동차는 보행자에게 커다란 위협이다. 교통사고 보고서에 따르면 시각장애인, 어린이, 자전거 운전자, 그리고 동물에 대한 사고가 일반 차량에 비해 사고 횟수가 더 많은 것으로 나타났다. [4] 이러한 전기자동차의 사고위험을 줄이기 위해 우리는 인공적으로 엔진 소리를 창조하고 재현하는 시스템을

가져야한다.

### 2.2. 기존 엔진 소리 설계 접근 방식

다수의 자동차 사운드 생성기는 애프터 마켓 시스템, ICE(Internal Combustion Engine - 기존 내연 기관 엔진 자동차)의 사운드 튜닝 또는 전기자동차 제조업체의 표준 장비로 만들어졌다. 브룸박스(Vroombox)는 저렴한 애프터 마켓 사운드 생성기를 제공한다, 이 시스템은 자동차의 타코미터 출력과 제공된 진공 센서를 입력으로 사용하는 ICE 차량을 대상으로 하지만 전기 자동차 요구에 맞게 수정할 수 있다.

로터스 그룹(Lotus Group)은 EVs (Lotus, 2010, Patrascu, 2009)를 대상으로 할로소닉(Halosonic)이라는 애프터 마켓의 사운드 - 제너레이터 시스템을 개발했다. 할로소닉은 현실적인 엔진 사운드를 기반으로 하지만 인위적인 사운드로 설정할 수도 있다.

제너럴 모터스 (General Motors), 닛산 (Nissan), 도요타 (Toyota) 및 미츠비시 (Mitsubishi)를 포함한 많은 전기 자동차 제조업체들이 미츠비시 iMiEV EV 용 표준 엔진 음향 장비와 같은 다가오는 EV 용 통합 인공 사운드 시스템을 개발했다. [5]

### 2.3. 샘플링 방식의 전기자동차 엔진 소리 시스템

현재 대부분의 전기자동차 제조업체는 전통적인 연소 엔진의 소리를 녹음하여 이 샘플링된 소리를 재생하는 방식을 취하고 있다. 이 PCM 샘플링 방식은 고품질의 콘덴서 마이크를 이용하여 배기관 약 50cm후방에서 엔진 RPM을 일정하게 유지하면서 약 3초간 녹음을 한다. 보통 약 1,500 RPM 에서 약 9,000 RPM 까지 녹음하여 주행 중 엑셀레이터의 입력값에 따라 재생한다. [6]

### 2.4. 샘플링 방식의 한계점

샘플링 방식의 엔진소리는 다음과 같은 한계점을 보인다. 첫째, 차의 스피드가 올라감에 따라 재생되는 엔진소리가 각 RPM 구간별로 녹음된 엔진 소리를 재생하는 것이므로 자연스럽게 이어지지 않고 구간별로 단절감이 느껴지기 쉽다. 둘째, 엑셀 페달의 조작에 따른 소리 변화의 반응이 실제 엔진 소리에 비해 둔감하다. 셋째, 생산기간이 오래 걸리고 제작비용이 비싼 편이다. 넷째, 기존 자동차엔진소리를 녹음해 재생하는 것

이므로 각 전기자동차 브랜드만의 특징적이고 개성있는 소리를 만들기 힘들다. 이러한 문제점을 해결하기 위해 실시간 웨이브테이블 소프트웨어 신디사이저 엔진 소리 시스템을 제안한다

### III. 웨이브테이블 소프트웨어 신디사이저 엔진 소리 시스템

#### 3.1. 개요

운전자가 가속페달을 밟으면 센서가 가속페달의 압력을 읽어 실시간 소프트웨어 엔진 소리 신디사이징을 통해 엔진 소리를 합성해내는 방식[6]으로 이 논문에서는 MaxMsp 프로그래밍 언어를 이용해 웨이브테이블 신디사이저 알고리즘을 만들어 시뮬레이션했다. [7] 자동차엔진은 일종의 악기와 같이 엔진 분당 회전수가 높을수록 높은 피치(음정)의 소리가 난다. 그리고 노면의 상태 등에 따라 그 소리의 피치가 흔들리게 된다. 또한 실내에서 듣는 엔진소리와 실외에서 듣는 소리는 저음 통과 필터 효과로 인해 다르게 들리게 된다. [8]

#### 3.2. 소프트웨어 신서사이저의 기본적인 구조

##### Structure of Synthesizer



Fig. 1 Structure of Synthesizer [9]

소프트웨어 신서사이저의 기본적인 구조는 다음과 같다(그림 1).

오실레이터에서 소리를 발진시켜 필터부에서 필요 없는 주파수를 제거한 뒤 앰프(Amp)에서 소리의 음량과 ADSR Shape를 결정한다. 오실레이터에서 발생시킬 수 있는 소리는 보통 사인(Sine)파, 사각(Square)파, 톱니(Sawtooth)파, 그리고 노이즈(Noise) 파이다. 사인파는 부드럽고 예쁜 소리가 나며 톱니파는 톱을 긁는 듯한 거친 소리가 난다. 사각파는 그 둘의 중간 정도 느낌으로 좀 비어있는 소리가 난다. 이렇게 발생되어진 소리가 필터를 거쳐 필요없는 주파수를 걸러내게 된다.

보통 하이 패스 필터(High pass Filter) 나 로우 패스 필터(Low pass Filter)를 많이 사용한다. 필터를 거쳐 만들어진 음색은 앰프부에서 소리의 음량과 소리가 발생되는 형태를 결정하게 된다. 즉 피아노처럼 어택(Attack) 음이 강하게 나오게 할 것인지 아니면 관악기를 레가토로 연주하듯이 어택을 느리게 하여 점차 크레센도로 나오게 할 것인지를 결정한다.

#### 3.3. 감산형 소프트웨어 신디사이저와 웨이브테이블 소프트웨어 신디사이저

소리 합성방법은 크게 2가지로 나눌 수 있다. 우선 전통적인 방식의 "감산형" 신디사이징은 순수하게 수학적 방법으로 음을 합성해낸다. 소리신호는 오실레이터, 필터, 앰프를 거쳐 악기소리의 음색을 모방하게 된다. 엔벨로프는 소리가 나오는 방식을 제어하고 필터는 소리의 스펙트럼을 바꾸고 음색을 드라마틱하게 바꾼다.

하지만 감산형 신디사이저의 몇 개의 오실레이터와 필터만으로는 콘서트홀의 그랜드 피아노나 스트라디바리우스 같은 바이올린 소리를 재현하기는 어렵다.

그래서 "웨이브테이블" 방식의 신디사이저가 발명되었다. 웨이브테이블 신디사이징은 실제 소리를 녹음하여 미세한 분절로 나누어 실시간으로 그 소리의 분절들을 합성하여 소리를 만들어내는 방법으로 보다 실제에 가까운 소리를 만들어 낼 수 있다. [10]

#### 3.4. 웨이브테이블 방식의 장점

웨이브테이블 음악 합성은 일반적인 PCM 샘플 버퍼 재생과는 다르다. 이는 간단한 디지털 사인파 생성과 유사하지만 적어도 두 가지 방법으로 확장되었다. 첫째, 단순한 사인파의 단일 주기 뿐만 아니라 좀더 일반적인 파형들이 웨이브테이블 소스에 포함되어 있다. 둘째, 음이 연주됨에 따라 파형을 변화시키는 동적 매커니즘이 다양한 소리의 변화를 가져온다.

이 매커니즘은 몇가지로 나뉘어 질 수 있는데 가장 간단한 것은 하나의 웨이브테이블에서 다른 하나로 크로스페이드되는 선형 크로스페이드 방식일 것이다. 더 복잡한 방식은 잘 선택된 몇 가지의 기본적 웨이브테이블을 합성하여 소리를 만드는 방식이다. (그림 2)

어떠한 경우에도 이 합성방식에 저장되고 사용되는 데이터의 양은 소리를 PCM 샘플링했을 때 보다 현저

하게 적다. 보통 샘플링 방식이 44.1kHz로 샘플링했을 때 분당 20-25 메가바이트의 데이터를 사용한다면 웨이브테이블 방식은 30-50 바이트의 데이터면 충분하다.

또한 웨이브테이블 신디사이징은 다른 신디사이징 방식에 비해 적은 실시간 연산을 요구한다. 이는 웨이브테이블 신디사이징이 역 이산 푸리에변환 (Discrete Fourier Transform) 을 음이 재생되기 이전에 미리 계산이 가능하기 때문이다. 다른 방식을 DFT를 실시간으로 계산해야 하기 때문에 더 많은 연산을 요구한다.

그러므로 전기자동차 엔진 소리 합성에 다른 방식에 비해 더욱 적합하다고 할 수 있다.

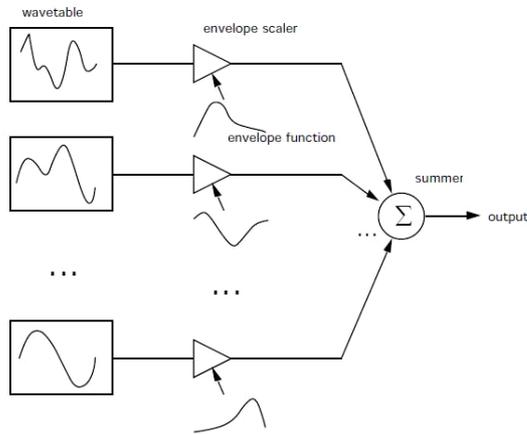


Fig. 2 Arbitrary wavetable mixing

### 3.5. 엔진 sound pitch 구현

엔진 소리의 피치는 피스톤의 회전 속도에 의해 결정된다. 피치는 초당 엔진의 회전수가 많아질수록 높아지게 된다.[9] 그러므로 운전자가 가속페달을 밟으면 피스톤의 회전 속도가 올라가고 엔진사운드의 피치가 상승하게 된다. 이를 소프트웨어 신디사이저로 구현하기 위해 소프트웨어 신디사이저의 OSC 에 가속페달에서 나오는 MIDI 신호를 어사인하여 리얼타임으로 피치의 프리퀀시를 조정하게 된다.

웨이브테이블 의 피치는 거의 주기적인 입력의 경우, 간단한 자동 상관 유형의 방법이 잘 작동한다. 평균 크기 차이 함수 (AMDF: average magnitude difference function) (수식1) 을 사용하여 AMDF의 최소값을 올바르게 선택하면 시간길이 t 를 단위 표본 시간의 분율의 정밀도로 안전하게 주어진 시간 t0 안에서 기본 주파수 f0 를 추론할 수 있다.

$$\gamma_{t_0}(\delta) \equiv \int_{-\infty}^{\infty} \left| x\left(t + \frac{\delta}{2}\right) - x\left(t - \frac{\delta}{2}\right) \right|^2 w(t - t_0) dt \quad (1)$$

$$\gamma_{t_0}(\tau(t_0)) = \min_{\Delta < \delta} \{ \gamma_{t_0}(\delta) \}$$

where  $\gamma'_{t_0}(\Delta) = 0$   
and  $\gamma'_{t_0}(\delta) > 0$  for  $0 < \delta < \Delta$

### 3.6. 엔진 소리를 위한 웨이브테이블 소스 합성

30여개의 웨이브테이블 소스 중에 사각파와 톱니파의 합성을 통해 엔진소리에 가장 근접한 소리를 만들었고 저역대와 고역대에서 실제 엔진에 가까운 주파수 반응을 얻었다.

## IV. 실험 방법과 결과

### 4.1. 실험 방법

실제 엔진, 샘플링 엔진 소리, 감산형 신디사이징 엔진소리, 웨이브테이블 신디사이징 엔진소리를 각각 엔진 회전수 4,500 RPM 하에 녹음하여 스펙트럼 분석기로 각 주파수 대의 반응을 수치화하였다[11].

### 4.2. 실험결과

각 엔진 소리의 스펙트럼 형상과 중요 주파수대의 편차를 파악하여 비교한 결과 다음과 같은 결과가 도출되었다.

#### 4.2.1. 샘플링 방식

샘플링 방식의 파형을 분석해보면 파형이 불규칙하게 나타나고 1,000Hz 정도까지의 주파수에서 소리의 음색에 큰 의미를 갖는 주파수가 많이 있음을 알 수 있다. 이는 실제 자동차 엔진 소리를 녹음 분석했을 때 나오는 2000-2200Hz 와 2800-3500Hz 대의 하모닉스 성분이 부족함을 그래프 상으로 알 수 있다.

#### 4.2.2. 감산형 신디사이저 방식

감산형 신디사이저 방식의 스펙트럼은 고역대에 샘플링 방식보다 더 많은 하모닉스 성분을 가지고 있는 것으로 나타났다. 하지만 자동차 엔진 소리에서 중요한 중저음역대가 부족한 것으로 나타났다. 웨이브테이블 방식과 비교해 봤을 때 중저음과 고음대의 하모닉스가 부족함을 알 수 있다.

4.2.3. 웨이브테이블 신디사이저 방식

그림 3에서 볼 수 있는 것처럼 웨이브테이블 소프트웨어 신디사이저 방식은 주파수 반응이 실제 엔진과 유사하고 그 편차가 다른 방식에 비해 적음을 알 수 있다. 운전자가 엔진소리를 인식할 때 중요한 주파수대인 500-2,000Hz 대에 일정한 소리를 발생시킴으로써 청각상 안정감을 주고 또한 실제 엔진소리에서 발생하는 1,000-2,000Hz 대의 하모닉스 성분이 풍부하여 실제에 근접한 엔진 소리 느낌을 주고 있다.

4.3. 실험 결과 비교

기존의 샘플링 방식의 전기 자동차 엔진 소리와 비교하여 봤을 때 실시간 엔진 소리 합성 방식은 그 반응성과 자연스러움에서 강점을 갖는다. 지금까지 실시간 엔진 소리 합성은 주로 감산형 신디사이징을 이용한 것이었으나 새롭게 웨이브테이블 신디사이징 방식을 이용함으로써 더욱 실제 엔진 소리에 가까운 엔진 소리를 합성해낼 수 있었다.

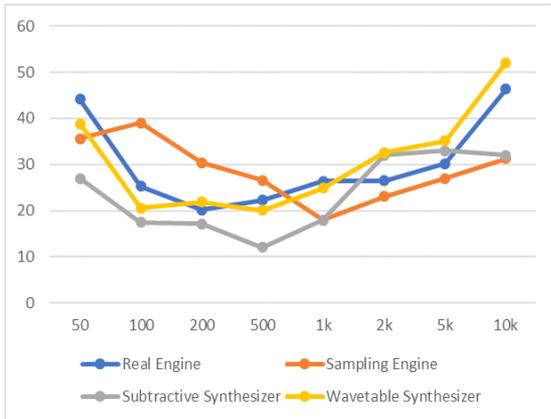


Fig. 3 Spectrum Analysis Results Comparison (X:Frequency(Hz),Y:Decibel(db))

표 1 Real Engine: 실제 엔진 사운드/ Sampling: PCM 레코딩 방식의 엔진 사운드/ Software Synth: 실시간 합성방식의 엔진 사운드의 각 주파수 대역별 음의 크기를 분석한 차트이다.

Table. 1 Spectrum Analysis Results (Values) (db)

Frequency (Hz)	Real Engine	Sampling Engine	Subtractive Synthesizer	Wavetable Synthesizer
50	44.1	35.6	27	38.8
100	25.3	39	17.5	20.6
200	20.2	30.4	17.2	21.9
500	22.3	26.6	12	20.1
1k	26.4	18	18	24.9
2k	26.5	23.1	32	32.6
5k	30.2	27	33	35.1
10k	46.3	31.3	32	52.1

표 2 실제 엔진사운드의 음량을 기준으로 봤을 때 샘플링 방식과 감산형과 웨이브테이블 소프트웨어 신디사이징 방식의 편차를 나타낸 표이다.

Table. 2 Spectrum Analysis Results (Error Rate) (db)

Frequency (Hz)	RealEngineValues -SamplingEngineValues	RealEngineValues -SubtractiveValues	RealEngineValues -WavetableValues
50	8.5	17.1	5.3
100	-13.7	7.8	4.7
200	-10.2	3	-1.7
500	-4.3	10.3	2.2
1k	8.4	8.4	1.5
2k	3.4	-5.5	-6.1
5k	3.2	-2.8	-4.9
10k	15	14.3	-5.8

V. 결론 및 향후과제

전기차 및 하이브리드 전기차의 수는 점차 증가하고 있는 추세이며 내연기관 자동차와는 다른 엔진 소리로 인해 안전상의 문제를 야기할 수 있는 가능성이 있다. 이에 각 자동차 제조사들은 인공적인 엔진 사운드 시스템 개발에 많은 연구와 투자를 하고 있다. [12]

기존의 샘플링 방식과 감산형 신디사이징을 이용한 연구에 비해 본 연구에서 제시한 웨이브테이블 신디사이징 방식은 샘플링 방식에 비해 현저히 적은 데이터를 사용하고 감산형 방식에 비해 적은 실시간 연산을

요구하므로 비용과 효율성 면에서 우수하다고 할 수 있을 것이다.

이 논문에서는 차 외부에서 들리는 엔진 사운드에 중점을 두고 사운드 디자인 연구를 실시하였으나 운전자 입장에서 들리는 엔진 사운드에 대한 실험까지 실행하지는 못하였다.

향후 이에 대한 연구와 이러한 웨이브레이블 소프트웨어 신서사이저 방식의 엔진 사운드를 실제 자동차에 적용하는 시스템에 대한 연구가 필요할 것이다.

### ACKNOWLEDGEMENT

The paper was supported by The research grant of the University of Suwon in 2017.

### REFERENCES

[ 1 ] M. Dudenhöffer, L. Hause, "Sound Perception Of Electric Vehicles," *Auto Tech Review*, vol. 2, no. 8, pp. 44-49, Sep. 2013.

[ 2 ] U. Sandberg, "Adding noise to quiet electric and hybrid vehicles," *An electric issue. Acoustics Australia*, vol. 40, no. 3, pp. 211-220, Mar. 2012.

[ 3 ] ANEC, "Silent but dangerous : when absence of noise of cars is a factor of risk for pedestrians," *ANEC Position paper*, vol. 8, no. 7, pp. 2, Aug. 2010.

[ 4 ] G. D'Amico, S. Lenzi, "Sound for Electric Vehicles," *Energy*, vol. 1, no.1, pp. 35, Sep. 2010.

[ 5 ] T. Bräunl, "Synthetic engine noise generation for improving electric vehicle safety," *International Journal of Vehicle Safety*, vol. 6, no. 1, pp. 2-4, Mar. 2012.

[ 6 ] X. Chai, Q. Wang, Y. Zhao, X. Liu, O. Bai, and Y. Li, "Unsupervised domain adaptation techniques based on auto-encoder for non-stationary EEG-based emotion," *Computational Biomedical*, vol. 2, no. 79, pp. 205-214, Dec. 2016.

[ 7 ] B. Han, S. Rho, S. Jun, and E. Hwang, "Music emotion classification and context-based music ecommendation," *Multimedia Tools Application*, vol. 47, no. 3, pp. 433-460, May 2010.

[ 8 ] G. Marbjerg, "Noise From Electric Vehicles," *Literature survey*, vol. 56, no. 1, pp. 39-40, Feb. 2013.

[ 9 ] J. Bae, J. Kim, "Engine Sound Design for Electric Vehicle by using Software Synthesizer," *Journal of the Korea Institute of Information and Communication Engineering*, vol. 21, no. 8, pp. 1547-1552, Aug. 2017.

[10] J. Bae, J. Kim, and Y. Yang "Physical modeling synthesizing of 25 strings Gayageum using white noise as exciter," *Journal of the Korea Institute of Information and Communication Engineering*, vol. 22, no. 5, pp. 740-746, May 2018.

[11] Ju Chan Na, "Optimization in Cooperative Spectrum Sensing," *Asia-pacific Journal of Convergent Research Interchange*, vol. 3, no. 1, pp. 19-31, March 2017.

[12] K. Kumar, "Estimation of Traffic Management and Road Safety," *Asia-pacific Journal of Convergent Research Interchange, Journal of the Korea Institute of Information and Communication Engineering*, vol. 3, no. 2, pp. 21-28, June 2017.



배준(June Bae)

연세대학교 정치외교학과 졸업  
상명대학교 컴퓨터음악대학원 졸업  
수원대학교 컴퓨터학부 박사과정  
※관심분야 : 전기차 사운드 디자인, AI 알고리즘 작곡, 머신러닝 플레이리스트 작성, 음성인식, DSP 설계



김장영(Jangyoung Kim)

2005년 2월: 연세대학교 컴퓨터과학 공학사  
2010년 5월: Pennsylvania State Univ. 공학석사  
2013년 7월: State University of New York 공학박사  
2013년 8월: University of South Carolina 교수  
2014년 3월: 수원대학교 컴퓨터학부 교수  
※관심분야 : Big data, Cloud computing, Networks