

소프트웨어 신디사이저를 이용한 전기자동차 엔진 사운드 디자인

배준¹ · 김장영^{2*}

Engine Sound Design for Electric Vehicle by using Software Synthesizer

June Bae¹ · Jangyoung Kim^{2*}

¹Department of Computer Science, The University of Suwon, Hwaseong 18323, Korea

²Department of Computer Science, The University of Suwon, Hwaseong 18323, Korea

요 약

전기자동차는 내연기관차와 달리 엔진 소리가 거의 없고 매우 조용하여 다양한 문제를 발생시킨다. 예를 들면, 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. 이러한 문제를 해결하기 위해 전기자동차는 인위적으로 엔진소리를 만들어 재생하여야 한다. 이 논문은 기존 전기자동차의 샘플링 방식의 엔진 사운드 방식에 대해 알아보고 그 문제점을 알아본다. 향상방안으로 본 논문에서는 기존 샘플링 방식 대신 소프트웨어 신디사이저의 알고리즘을 구현하고 프로그래밍 언어를 통해 엔진 사운드를 소프트웨어적으로 구현한다. 신디사이저를 이용한 방식이 기존 샘플링 방식에 비해 우수한 성능을 가진 것으로 실험결과를 통해 입증되었다. 또한, 이러한 엔진 사운드 신디사이징을 통해 점차 보급률이 높아지고 있는 전기자동차의 안전성과 운전의 편의성, 즐거움을 줄 것으로 기대한다.

ABSTRACT

Unlike diesel locomotives, electric vehicles have various issues because they have very quiet engine sound. For example, pedestrians are exposed to the dangerous electric vehicles on the road because they can not recognize the electric vehicles' sound. Moreover, the driver is unable to recognize how fast driver's car is driving at a certain speed. To solve these problems, electric cars' sound needs to be artificially implemented and played. This paper examines the problems of the previous sampling engine sound approach. In this paper, instead of using sampling sounds, we developed a novel synthesizer algorithm via programming languages as a software. In experimental results, we demonstrated and verified our proposed synthesizer's approach is superior to the previous sampling approach. In addition, through these synthesizer's approach, we highly expect the proposed synthesizer's approach will give safety, convenience and comfort to the electric vehicles' users.

키워드 : 전기자동차, 사운드디자인, 소프트웨어신디사이저, 엔진사운드

Key word : Electric vehicle, Sound design, Software Synthesizer, Engine sound

Received 07 June 2017, Revised 09 June 2017, Accepted 14 June 2017

* 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 <https://doi.org/10.6109/jkiice.2017.21.8.1547>

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. 서 론

전기자동차 (Electric Vehicle)는 내연기관차와 달리 엔진 소리가 거의 없고 매우 조용하다. 일견 소음이 없다는 것이 좋다고 생각될 수도 있으나 이는 다음과 같은 문제를 발생시킨다. 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[1]. 이러한 문제를 해결하기 위해 전기자동차는 소리가 없는 전기적 모터 장치를 보완하기 위해 인위적으로 엔진소리를 만들어 재현하여야 한다[2].

본 논문에서는 이러한 엔진 소리를 소프트웨어 신디사이저를 이용해 제작하는 방법을 연구한다. 2장에서는 기존 전기자동차의 샘플링 방식의 엔진 사운드 방식에 대해 알아보고 그 문제점을 알아본다. 3장에서는 소프트웨어 신디사이저의 알고리즘 구조를 알아보고 MaxMap 프로그래밍 언어를 통해 엔진 사운드를 소프트웨어적으로 구현하는 방법에 대해 알아본다. 이는 RPM(Revolutions per minute:분당회전수)에 따른 엔진 사운드 pitch 구현, 실제 엔진 사운드처럼 느껴지게 만드는 엔진 음색 구현, 그리고 진동 등에 의해 발생하는 진동 (wobbling) 효과 구현 등으로 이루어진다. 이 모든 과정은 녹음 등을 통한 재생이 아닌 실시간으로 연산이 이루어지는 소프트웨어 신디사이저를 이용해 만들어진다.

다음으로 4장에서는 기존의 샘플링 방식의 엔진 사운드와 새로이 만들어낸 소프트웨어 신디사이저방식의 엔진사운드를 스펙트럼 분석기를 통해 분석 비교한다. 분석방법은 엔진 회전수 4,500RPM 하에서의 엔진 사운드를 스펙트럼 분석하여 각 주파수대 별로 엔진 사운드의 볼륨을 비교하여 운전자의 청각에 미치는 영향을 분석하였다. 마지막으로 5장에서는 결론 및 향후과제를 제시한다.

II. 기존 전기자동차 (EV) 엔진 사운드 시스템

2.1. 전기자동차 엔진 사운드 시스템의 필요성

서론에서 언급한 바와 같이, 전기자동차는 전기 엔진에 의해 방출되는 소리가 없기 때문에 매우 위험하다.

특히, 이러한 무음의 자동차는 다음과 같은 보행자들에게 심각한 피해를 입힐 수 있다. 시각 장애인들, 어린이들, 자전거 타는 사람들, 그리고 동물들에게도 매우 위험하다. 2009년 9월 이탈리아 고속 도로 교통 안전국은 하이브리드 전기 승용차에 의한 보행자 및 자전거 사고의 기술 보고서를 발표하였다. 유사한 상황을 비교하여 보행자 및 자전거 사고 발생 시 전기자동차에 의해 발생하는 보행자 및 자전거 사고의 발생률에 관한 연구였다. 연구 결과에 따르면 전기자동차는 특정 차량 저속 주행 시 일반엔진 자동차보다 더 높은 수의 충돌 사고가 발생했다고 한다. 이러한 사고의 위험성을 줄이기 위해 전기자동차는 인위적으로 엔진 사운드를 만들어 재생하는 시스템을 필수적으로 갖추어야만 한다. 지금까지 주로 쓰이는 전기자동차용 엔진 사운드 시스템은 아래와 같다[3].

2.2. 현존하는 엔진 사운드 생성 방식

다수의 자동차 사운드 생성기는 애프터 마켓 시스템, ICE(Internal Combustion Engine - 기존 내연 기관엔진 자동차)의 사운드 튜닝 또는 전기자동차 제조업체의 표준 장비로 만들어졌다. Vroombox는 저렴한 애프터 마켓 사운드 생성기 (Vroombox, 2011)를 제공한다, 이 시스템은 자동차의 타코미터 출력과 제공된 진공 센서를 입력으로 사용하는 ICE 차량을 대상으로 하지만 전기자동차 요구에 맞게 수정할 수 있다.

로터스 그룹은 전기자동차 (Lotus, 2010, Patrascu, 2009)를 대상으로 Halosonic이라는 애프터 마켓의 사운드 - 제너레이터 시스템을 개발했다. Halosonic은 현실적인 엔진 사운드를 기반으로 하지만 인위적인 사운드로 설정할 수도 있다. 이것은 테슬라 승용차와의 로터스 협력의 부수적인 제품으로 전기자동차 제조사에게 테슬라 승용차 용 자동차 부품을 제공한다.

제너럴 모터스 (General Motors), 닛산 (Nissan), 도요타 (Toyota) 및 미쯔비시 (Mitsubishi)를 포함한 많은 전기 자동차 제조업체들이 Mitsubishi iMiEV EV 용 표준 엔진 음향 장비와 같은 다가오는 전기자동차용 통합 인공 사운드 시스템을 개발했다 (Hanada and Yoshida, 2007). 이 사운드 생성기 중 어느 것도 현실적인 엔진 사운드를 재생하려고 하지 않는다. 그 대신에, 그들은 비 자동차 관련 경고음을 사용하거나 GM Volt의 경우 경적을 사용하고 있다[4].

2.3. Sound sampling 방식

이는 기존 실제 자동차소리를 녹음하여 재생하는 방식이다. 녹음장비를 이용해 자동차의 배기음을 녹음한 뒤 PCM(Pulse Code Modulation) 방식으로 속도에 맞춰 맞는 샘플을 재생하는 방식이다. PCM 방식은 아날로그 신호를 디지털 신호로 변조하여 전송하는 방식으로 펄스코드변조방식은 먼저 음성정보를 일정간격의 시간으로 샘플링하여 펄스진폭변조 신호를 얻은 다음, 이를 다시 양자화기를 거쳐 각 진폭값을 평균화하고, 이 양자화된 값에 2진 부호값을 할당함으로써 수행된다.

첫번째 단계는 로터스 자동차회사와 함께 한 오리지널 엔진 소리를 샘플링하는 것이었다. 사운드 샘플을 선택하여 운전자가 사용할 음향 샘플을 선택할 수 있다. 고품질의 콘덴서 마이크를 이용하여 배기관의 50cm 뒤에서 녹음을 하였다. 엔진의 RPM을 약 3초간 일정하게 유지하고 그 소리를 녹음하여 재생하는 방식이다. 보통 1,500 RPM 에서 9,000 RPM 정도를 녹음 재생한다.

2.4. 문제점

이러한 사운드 샘플링은 다음과 같은 문제점을 나타낸다. 우선 속도가 올라감에 따라 RPM 구간별로 엔진 소리가 단절된 느낌이 들기 쉽다. 이는 실시간 합성방식이 아닌 미리 녹음된 엔진 소리를 구간별 재생함에 기인한 것이다. 그리고 운전자의 페달 조작에 따른 소리변화의 민감도가 떨어진다. 또한 제작기간과 제작비용이 많이 들어간다. 그리고 기존에 있는 자동차의 엔진소리를 녹음함에 따라 그 브랜드만의 고유성이 사라지게 된다. 이러한 문제점을 해결하기 위해 다음과 같은 실시간 소프트웨어 신디사이저 엔진사운드 시스템을 제안한다.

III. 소프트웨어 신디사이저를 이용한 Realtime processing 방식의 새로운 사운드 시스템 구현

3.1. 개요

이는 운전자가 밟은 가속페달을 센서를 사용하여 감지하여 실시간 소프트웨어 신디사이징을 통해 엔진 사운드를 만들어내는 방식이다[5].

본 논문에서는 MaxMsp 프로그래밍 언어를 이용해 자동차 엔진 소리를 시뮬레이션 하였다[6]. 엔진 소리를 소프트웨어 신디사이저로 시뮬레이션 하기 위해 다음과 같은 사항이 고려되었다.

엔진의 사운드는 일종의 신디사이저로서 엔진소리의 회전수가 높아질수록 엔진음의 pitch가 높아진다. 그리고 주행에 따른 진동으로 인한 Wobbling 효과가 나타나고 주행 중 빠른 속도로 인한 도플러효과가 발생한다. 또한 실내에서 듣는 엔진소리 (필터 효과) 는 외부에서 듣는 소리와 다르게 들리게 된다[7].

3.2. 소프트웨어 신디사이저의 기본적인 구조

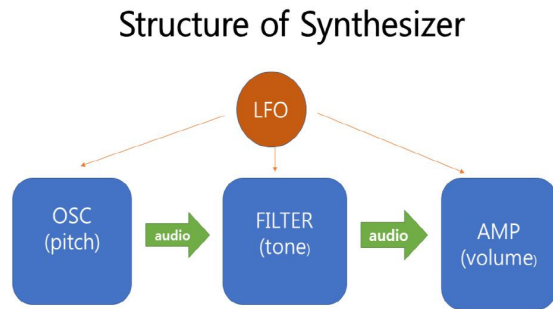


Fig.1 Overview Structure of Synthesizer

소프트웨어 신디사이저의 기본적인 구조는 그림 1과 같다. 그림 1을 보면, OSC (Oscillator : 주파수 발생기)에서 소리를 발진시켜 필터부에서 필요없는 주파수를 제거한 뒤 AMP (Amplifier: 증폭기)에서 소리의 음량과 파형을 결정한다. 오실레이터에서 발생시킬 수 있는 소리는 보통 사인파, 사각파, 톱니파, 그리고 노이즈파이다. 사인파는 벨소리나 전기피아노처럼 부드럽고 예쁜 소리가 나며 톱니파는 톱니를 굽는 듯한 거친 소리가 난다. 사각파는 그 둘의 중간 정도 느낌으로 좀 비어있는 소리가 난다. 이렇게 발생되어진 소리가 필터를 거쳐 필요 없는 주파수를 걸러내게 된다. 보통 고역 통과 필터나 저역 통과 필터를 많이 사용한다. 필터를 거쳐 만들어진 음색은 AMP에서 소리의 음량과 소리가 발생하는 형태를 결정하게 된다. 즉 피아노처럼 어택음이 강하게 나오게 할 것인지 아니면 관악기를 레가토로 연주하듯이 어택을 느리게 하여 점차 크레센도로 나오게 할 것인지를 결정한다.

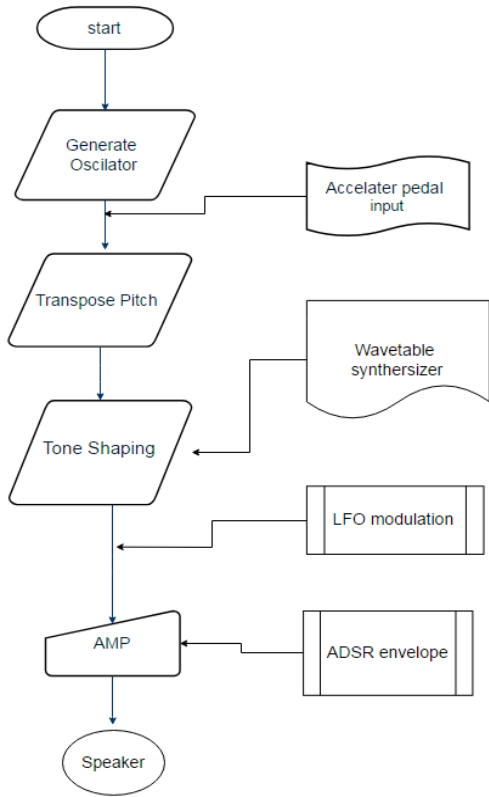


Fig. 2 Max Engine Synthesizer Programming Diagram

3.3. 엔진 사운드 pitch 구현

그림 2는 신서사이즈 프로그래밍 다이어그램으로 도식화한 것이다. 엔진 사운드의 피치는 피스톤의 회전 속도에 의해 결정된다. Pitch는 초당 엔진의 회전수가 많아질수록 높아지게 된다. 그러므로 운전자가 가속페달을 밟으면 피스톤의 회전 속도가 올라가고 엔진사운드의 피치가 상승하게 된다.

$$f = 1 / T \text{ and } f = c / \lambda \quad (1)$$

(λ = Wave length, c = Wave speed, f = frequency, T = Time)

여기서 frequency를 엔진회전수라고 보면 다음과 같은 그래프가 만들어진다(그림 3).

이를 소프트웨어 신디사이저로 구현하기 위해 소프트웨어 신디사이저의 오실레이터에 가속페달에서 나오는 MIDI 신호를 지정하여 실시간으로 pitch의 프리퀀시를 조정하게 된다.

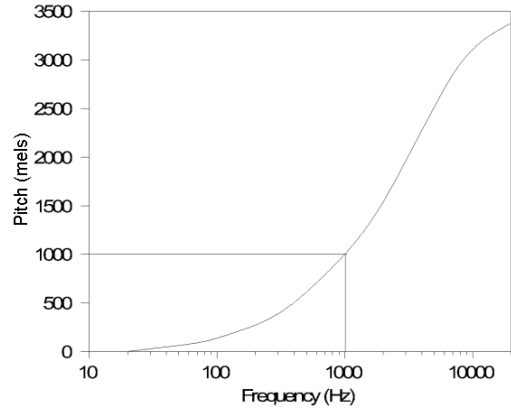


Fig. 3 Pitch and Frequency(RPM) Chart

3.4. 엔진 음색 구현 (그림4, 5)

실제 엔진 사운드의 주파수 스펙트럼을 파악하여 가장 실제에 가까운 wavetable 소스를 찾아 소리를 합성하였다. 실험결과 사각파와 톱니파의 합성인 Squ-Sw1 wavetable이 가장 실제 엔진에 근접한 소리를 만들어내었다. 이를 통해 실제 엔진이 다양한 진동을 통해 소리를 내는 것을 시뮬레이션 하였다.

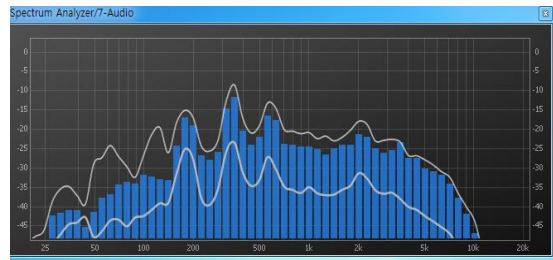


Fig. 4 Real Engine Sound Spectrum

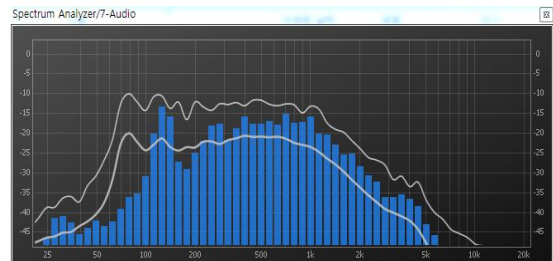


Fig. 5 Wavetable Synth Engine Sound Spectrum

3.5. 엔진 진동 소리 (Wobbling) 효과

실제 주행 시 엔진 소리는 항상 일정하게 나오지 않고 노면 상태나 차체 특성에 따라 진동 효과가 발생한다. 이러한 사항은 기존 신디사이징 방식 엔진에서는 간과했던 부분이다. 이를 시뮬레이션하기 위해 Max의 LFO (Low Frequency Oscillator)를 이용하여 pitch 모듈레이션을 사용하였다. LFO 피치모듈레이션을 랜덤하게 사용한 결과 실제 엔진 소리에 더욱 근접하는 결과를 얻을 수 있었다. 이러한 진동 효과는 기존 신디사이저 엔진 사운드 디자인에는 잘 구현되어있지 않은 것으로서 엔진의 실제감을 살리는데 중요한 요소이다. 이를 스펙트럼 분석해보면 그림 6과 같다.

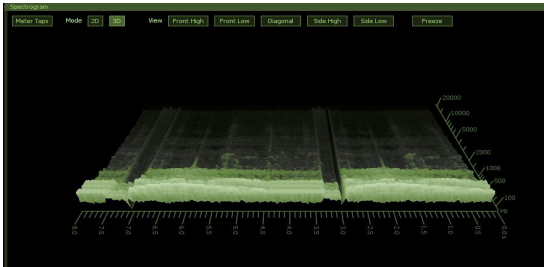


Fig. 6 LFO Modulation Spectrum

IV. 실험방법 및 결과

4.1. 실험 방법

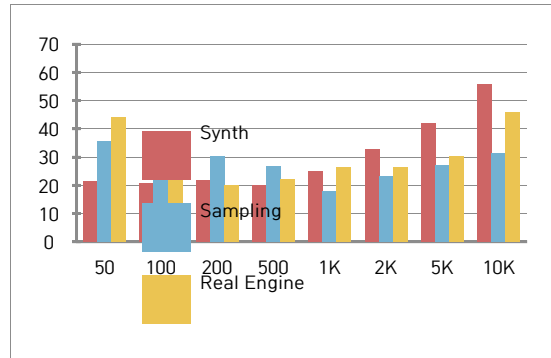
동일한 엔진 회전수 RPM 4,500 하에서의 각 엔진사운드를 스펙트럼 분석기를 통해 실시간 분석하여 보았다. 스펙트럼 분석 화면에서 X축은 주파수의 높낮이, Y축은 소리의 크기를 db(데시벨)로 나타낸다.

Table. 1 Spectrum analyzer chart

system Frequencies(Hz)	criterion: Real Engine (db)	Sampling (db)	Software Synth (db)
50	44.1	-8.5	-22.7
100	25.3	13.7	-4.7
200	20.2	10.2	1.7
500	22.3	4.3	-2.2
1k	26.4	-8.4	-1.5
2k	26.5	-3.4	6.1
5k	30.2	-3.2	11.8
10k	46.3	-15	9.4

4.2. 실험결과

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



(X:Hz / Y:db)

Fig. 7 Frequency Comparison chart

그림 7은 표 1의 수치를 차트로 만든 것이다. 노란색 실제 엔진 그래프와 빨간색 신디사이저 엔진 그래프가 유사함을 볼 수 있다.

Table. 2 Error rates comparison analysis

system Frequencies(Hz)	Real Engine (db)	Sampling (db)	Software Synth (db)
50	44.1	35.6	21.4
100	25.3	39.0	20.6
200	20.2	30.4	21.9
500	22.3	26.6	20.1
1k	26.4	18	24.9
2k	26.5	23.1	32.6
5k	30.2	27.0	42.0
10k	46.3	31.3	55.7

표 2는 실제 엔진사운드의 음량을 기준으로 봤을 때 샘플링 방식과 소프트웨어 신디사이저 방식의 편차를 나타낸 표이다. 신디사이저방식이 실제 엔진과 유사함을 볼 수 있다.

4.2.1. 샘플링 방식

샘플링 방식의 파형을 분석해보면 주파수가 주로 100Hz ~ 1,400Hz 에 분포되어 있고 파형이 불규칙하게

나타남을 볼 수 있다. 샘플링 방식에서는 600Hz에서 피크가 나타나고 1,000Hz 정도까지의 주파수에서 소리의 음색에 큰 의미를 갖는 주파수가 많이 나옴을 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. 소프트웨어 신디사이저 방식

이에 비해 소프트웨어 신디사이저 방식은 주파수가 100Hz ~ 10,000Hz에 넓게 분포되어있고 파형이 고르게 나타나고 있다. 운전자가 엔진소리를 인식할 때 중요한 주파수대인 500-2,000Hz 대에 일정한 소리를 발생시킴으로써 청각상 안정감을 주고 또한 실제 엔진 소리에서 발생하는 1,000-2,000Hz 대의 하모닉스 성분이 풍부하여 실제에 근접한 엔진 소리 느낌을 주고 있다.

V. 결 론

신디사이저 방식의 엔진사운드는 샘플링 방식의 엔진 사운드와 달리 각 RPM 구간별로 생길 수 있는 엔진 사운드의 단절감을 없애고 운전자의 가속페달 조작에 좀 더 민감하게 반응하는 장점이 있다. 이는 실시간 음정과 음색의 합성을 통해 엔진소리를 만들어 냄으로써 가능하다. 또한 각 자동차 회사만의 독특한 사운드를 만들 수 있으며 설계에서 샘플링방식에 비해 심플하게 만들 수 있는 장점이 있다.

ACKNOWLEDGMENTS

The paper was supported by The research grant of the University of Suwon in 2016.

REFERENCES

- [1] M. Dudenhöffe, 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] G. D'Amico, S. Lenzi, "Sound for Electric Vehicles," *Energy*, vol. 1, no. 1, pp. 35, Sep. 2010.
- [4] 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 .
- [5] M. Bodden, T. Belschner, "Principles of Active Sound Design for electric vehicles," *Inter-Noise*, vol. 11, no. 1, pp.1693-1697, Mar. 2016.
- [6] H. Auweraer, K. Janssens, D. Sabbatini, K. Sant, and F. Deblauwe, "Designing Electric Vehicle Exterior Sound and Sound," *15th International Conference on Experimental Mechanics*, vol. 1, no. 1, pp. 1-8, Jul. 2012.
- [7] G. Marbjerg, "Noise From Electric Vehicles," *Literature Survey*, vol. 56, no.1, pp. 39-40, Feb. 2013.



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 조교수
2014년 3월: 수원대학교 컴퓨터학부 조교수
※관심분야 : Big data, Cloud computing, Networks