



차량 사고 발생음을 이용한 FFT 분석 기반 고속도로 2차 사고 예방 시스템

A Highway Secondary Accident Prevention System based on FFT Analysis of Vehicle Collision Sounds

정민기¹, 조영신¹, 함용식^{1,2}, 김종배^{1,2,#}

Minki Jung¹, Young Shin Cho¹, Yongsik Ham^{1,2}, and Joong Bae Kim^{1,2,#}

¹ 국립공주대학교 기계자동차공학부 (Department of Mechanical and Automotive Engineering, Kongju National University)

² 국립공주대학교 글로벌생산제조기술연구소 (Global Institute of Manufacturing Technology, Kongju National University)

Corresponding Author / E-mail: joongbae.kim@kongju.ac.kr, TEL: ██████████

ORCID: 0000-0003-1769-7361

KEYWORDS: Fast fourier transform (고속 푸리에 변환), Noise analysis (소음 분석), Frequency (주파수), Collision detection system (충돌 감지 시스템), Sound pressure (음압)

This study introduces a highway secondary accident prevention system that employs Fast Fourier Transform (FFT) analysis of vehicle collision sounds. The system is designed to identify abnormal acoustic patterns produced during collisions and skidding events, enabling faster and more accurate accident detection than traditional methods. When a crash is detected, visual warning signals are instantly sent to nearby vehicles using LED devices powered by a photovoltaic panel and an energy storage system (ESS). Experimental results showed 100% detection accuracy during independent playback of collision, skidding, and driving sounds, and 80% accuracy during simultaneous playback. These results confirm the system's ability to effectively differentiate accident-related sounds and deliver timely alerts. This research offers an innovative and environmentally sustainable approach to enhancing highway safety and reducing the societal and economic consequences of secondary accidents.

Manuscript received: March 17, 2025 / Revised: June 7, 2025 / Accepted: June 16, 2025

1. 서론

교통안전은 현대사회에서 국민의 생명과 직결된 중대한 사회적 과제이다. 특히 고속도로에서 발생하는 교통사고는 높은 주행 속도로 인해 치사율이 높고, 사고 발생 시 사회·경제적 비용이 막대하여 심각한 문제로 인식되고 있다. 경찰청 통계에 따르면, 2023년 국내 교통사고 사망자는 2,551명으로 전년 대비 감소하였으나, 여전히 연간 수천 명의 생명이 교통사고로 인해 희생되고 있다[1].

교통사고 중에서도 1차 사고 이후 적절한 위험 전달이 이루어지지 않아 발생하는 2차 사고는 일반 사고보다 치사율이 약 6배 높은 것으로 보고되며[2], 후속 차량 운전자의 인지 지연과 대응 실패가 주요 원인으로 지목된다. 이러한 2차 사고는 1차

사고보다 피해 규모가 더 클 수 있으므로, 사고 직후 후속 차량에 빠르고 명확한 경고를 제공할 수 있는 기술적 대안 마련이 시급하다.

현재까지 제안된 사고 감지 및 알림 시스템은 주로 목격자의 신고 또는 영상 기반 기술에 의존하고 있으며[3-8], 이는 사고 감지와 경고 전달 간의 시간 지연과 감시 장비의 공간적 한계로 인해 즉각적 대응이 어렵고, 2차 사고 예방에는 한계가 있다. 또한, 영상 기반 시스템은 설치 구간 외부에 대한 감지가 불가능하며, 장비 설치·운영에 따른 비용 부담도 크다.

AI (Artificial Intelligence) 기반의 최신 감지 기술은 차량의 움직임을 분석하여 사고를 예측하거나 감지할 수 있으나, 고성능 연산 장치와 대규모 학습 데이터가 요구되어 고속도로 전역에 적용하기에는 비용 및 인프라 측면에서 제약이 크다[9]. 한편,

터널 내 사고 감지를 위한 GMM (Gaussian Mixture Model) 기반 알고리즘은 폐쇄된 환경에서는 효과적이거나, 개방된 고속도로에서는 기상 변화나 조도 차이로 인해 정확도가 저하될 수 있다[10].

이에 본 연구는 이러한 기존 기술의 시간적 지연, 공간적 제약, 고비용 문제를 극복할 수 있는 고속도로 2차 사고 예방 시스템을 제안한다. 제안된 시스템은 FFT (Fast Fourier Transform) 기반 음향 분석 기술을 통해 실시간으로 차량 충돌음 및 스키드음을 감지하고, 이를 바탕으로 LED (Light Emitting Diode)를 활용한 시각적 경고를 후속 차량에 제공한다. 음향 기반 시스템은 기상이나 조명 환경의 영향을 받지 않으며, 영상 기반 시스템 대비 경제적이고 설치 유연성이 높다는 장점을 가진다.

또한, 본 시스템은 태양광 패널과 에너지 저장 시스템(ESS)을 활용하여 외부 전력 공급 없이도 24시간 자율 운용이 가능하도록 설계되었으며, 환경 친화성과 에너지 자립 측면에서도 유리하다. 본 연구의 1차 목표는 시스템의 실현 가능성을 확인하고, 프로토타입을 제작하여 성능을 검증하는 것이다. 이후에는 실제 고속도로 환경에 적합한 구조 설계를 수행하여 현장 적용이 가능한 기술로 확장할 계획이다[11,12]. 제안된 시스템은 고속도로 곡선 구간, 터널 등 사고 위험이 높은 환경에서의 2차 사고를 효과적으로 저감할 수 있을 것으로 기대된다.

2. 본론

2.1 시스템 구성

본 연구에서 제안하는 시스템은 크게 외관부(Hardware Part)와 회로부(Circuit Part)로 구성된다. Fig. 1과 같이 시스템의 외관부는 사고음을 수집하기 위한 마이크로폰 센서와 사고 알림을 위한 LED 패널, 태양에너지 수집을 위한 태양광 패널로 구성된다. 이렇게 구성된 시스템은 고속도로의 곡선 구간에 설치되어 실시간으로 사고음을 수집하여 사고 여부를 판단하고, 사고 발생 시 LED를 이용해 후속 차량 운전자에게 사고를 알린다. 평상시에는 LED가 작동하지 않으며, 스키드음 발생 시에는 노란색, 충돌음 발생 시에는 빨간색 빛을 발생시킨다. 회로부는 Fig. 2와 같이 구성된다. ESP32보드를 기반으로, 태양광 패널과 리튬 이온 배터리의 충전 전압을 맞추기 위한 DC-DC 가변 컨버터와, 5V 승압 모듈, 배터리 충전 모듈, 마이크로폰 센서, LED 라이트 패널이 각각 연결되어 있으며 INMP441 마이크로폰 센서는 ESP32보드와 연결되어 구성된다.

2.2 시스템 작동 순서

앞서 언급한 바와 같이 본 연구에서 제안하는 시스템은 태양광 패널로부터 얻은 전력을 배터리에 저장하고, 시스템 작동에 사용한다. 본 연구에서 선정된 태양광 패널의 전력은 9V 전압으로 공급되기 때문에 배터리 충전 모듈을 이용하기 위해 DC-DC 가변 컨버터가 필요하다. DC-DC 가변 컨버터를 통해 5V로 조정된 전력은 배터리 충전 모듈을 통해 리튬 이온 배터리에

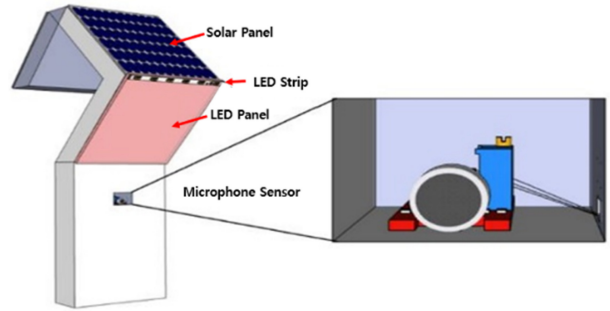


Fig. 1 Schematic of hardware part

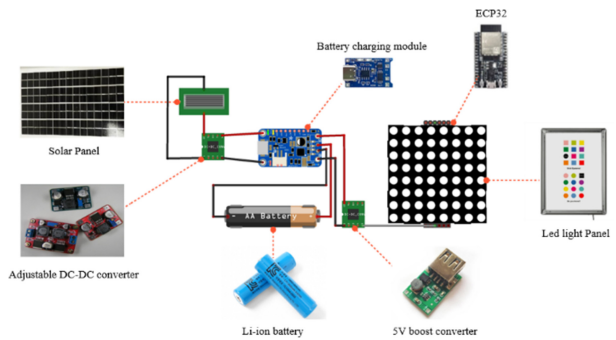


Fig. 2 Circuit diagram

저장된다. 사고음 수집부터 사고 알림까지의 과정은 Fig. 3에 제시된 순서도를 따라서 진행된다. 먼저, 내장된 마이크로폰 센서부를 통해 실시간으로 음향을 수신하고, 이를 ESP32 보드로 전달한다. 전달된 음향 데이터는 FFT를 통해 주파수 영역으로 변환된다. 변환된 정보에서 시스템은 주파수 영역별로 충돌과 스키드음을 구분하고 이를 기반으로 수신부의 LED를 제어하여 사고 발생 시 빨간색 및 노란색 LED가 각각 출력된다.

2.3 송수신 및 센서

실시간 음향 정보는 회로부의 INMP441 마이크 모듈을 통해 취득되고 ESP32보드로 전송되어 즉각적으로 FFT 과정을 거친다. ESP32보드에는 FFT를 수행하기 위해 FFT Library를 탑재하였고, 이를 통해 실시간 주파수 분석이 가능하다. 주파수 영역으로 변환된 실시간 음향 데이터는 미리 입력된 주파수 기준에 따라 충돌과 스키드음 발생 상황을 구분하고 LED 점등 여부와 색상을 결정한다.

음향 데이터 분석에서 언급하겠지만, 이전 연구 결과를 통해서 빨간색 LED 점등(충돌 시) 조건은 500 Hz 이하의 음향 신호가 이전보다 30 dB 이상 높게 관측되었을 때로 한다[3].

2.3.1 신호처리

FFT는 시간 영역의 신호를 주파수 영역으로 변환하는 Fourier Analysis의 대표적인 알고리즘이다. FFT에서는 연산 속도와 효율성을 위해 삼각함수의 주기성을 활용하고 아주 적은 계산량으로 Fourier Analysis가 가능하다. FFT 이전에는

Discrete Fourier Transform (DFT)을 활용해 주파수와 진폭 정보를 추출했지만 계산량이 많아 속도가 느리다는 한계가 있었다. FFT는 이러한 계산 복잡도를 대폭 줄여 실시간으로 신호의 스펙트럼을 분석할 수 있는 방식으로 발전하였으며, 본 연구에서는 FFT의 빠른 속도를 착안하여 다양한 사고음을 효과적으로 분석한다[3,13].

Arduino 기반의 ESP32는 FFT Library 사용이 가능하다. FFT Library는 Arduino 기반의 보드와 연결된 마이크로폰 센서에서 받아들인 음향 파일을 주파수 대역으로 변환하는 기능을 제공한다. 이 과정에서 I2S (Inter-IC Sound) 기술을 사용하는데 이는 음향파일을 디지털 데이터로 수집하여 ESP32보드로 전달하는 기술을 뜻한다[14]. 아날로그 방식에 비해 데이터 손실과 노이즈가 적고, 다양한 샘플링 주기와 해상도를 설정할 수 있어 음향 데이터를 정밀하게 분석할 수 있는 기술이다[15].

본 시스템에서는 위와 같은 과정을 통해 디지털 데이터로 받은 음향 파일을 FFT를 통해 주파수 스펙트럼을 분석해 LED를 제어한다.

본 시스템은 I2S 인터페이스를 이용해 오디오 데이터를 샘플링하며, 샘플링 주파수는 데이터 처리와 저장에 필요한 속도를 유지하면서도 계산량과 메모리 사용을 효율적으로 관리할 수 있도록 설정해야 한다. 이를 통해 오디오 분석과 하드웨어 성능을 최적화할 수 있다.

각 샘플은 16비트 정수 값으로 저장되며, FFT 수행을 위해 실수(Real)와 허수(Imaginary)배열로 변환된다. FFT의 기본 수식은 식(1)과 식(2)로 표현할 수 있으며, X(n)는 시간 도메인의 값이므로 식(3)과 같이 다시 표현할 수 있다.

$$X(k) = \sum_{n=0}^{N-1} x(n) \cdot e^{-j\frac{2\pi}{N}kn}, k = 0, 1, \dots, N-1 \quad (1)$$

$$X(n) = \frac{1}{N} \sum_{k=0}^{N-1} X(k) e^{j2\pi(k-1)\left(\frac{n-1}{N}\right)} \quad (2)$$

$$x(n) = \frac{1}{N} \sum_{k=1}^N a(k) \cos\left\{ \frac{2\pi(k-1)(n-1)}{N} \right\} + b(k) \sin\left\{ \frac{2\pi(k-1)(n-1)}{N} \right\} \quad (3)$$

a(k): real[X(k)], b(k): imaginary[X(k)], 1 ≤ n ≤ N

이를 통해 FFT 수행 후 각 주파수 성분의 크기는 식(4)을 이용해 계산한다.

$$|X(k)| = \sqrt{(Re(X(n)))^2 + (Im(X(k)))^2} \quad (4)$$

$$\Delta f = \frac{f_s}{N} \quad (5)$$

샘플링 주파수와 샘플 수를 기반으로 주파수 해상도는 식(5)을 이용해 계산한다. 본 시스템에서는 32 kHz의 샘플링 주파수와

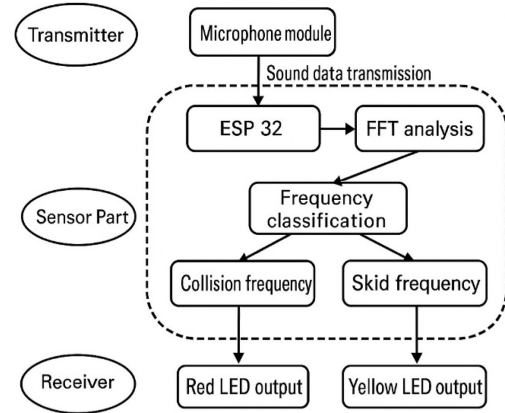


Fig. 3 Decision process of the system

샘플 수 2048개를 적용한 결과 본 시스템은 15.63 Hz의 간격으로 주파수 성분을 분석할 수 있다.

이전 연구 결과와 본 연구를 통해 확인한 충돌음 발생 시 주요 주파수 범위는 500 Hz 미만으로 나타났다. 본 시스템에서 제공하는 15.63 Hz의 주파수 해상도는 500 Hz 미만의 주파수 범위를 약 32개의 구간으로 나누어 주요 주파수 성분을 명확히 분석할 수 있는 수준이다.

본 연구의 목적은 주파수의 초정밀 분석이 아닌, 대략적인 주파수 대역 분석 및 감지에 초점을 맞추었으며, 이 경우 15.63 Hz 해상도는 주요 주파수 범위를 분석하기에 충분히 적절하다. 또한, 동일한 원리로 5,000 Hz 이하(스키드음)의 주파수 영역은 약 320개의 구간으로 나누어 주요 성분을 명확히 분석할 수 있으며, 이를 통해 특정 주파수 대역에서의 변화를 효과적으로 감지할 수 있다. 특히, 본 연구에서는 단순히 주파수의 영역만 고려한 것이 아니라, 음압(Sound Pressure)과 주파수 진폭(Amplitude)을 모두 고려하여 주요 주파수의 범위를 결정하였다. 음압은 음향 에너지가 전달되는 과정에서 매질의 압력 변화로 정의되며, 주파수 진폭은 신호가 특정 주파수에서 가지는 세기 또는 에너지를 나타내는 값으로 주파수 스펙트럼에서 해당 주파수 성분의 크기를 의미한다. 본 시스템은 주요 주파수 대역의 변화를 효과적으로 감지하기 위해 음압과 주파수 진폭을 기반으로 분석을 수행하였으며, 이는 특정 주파수 대역에서의 신호 특성을 보다 명확히 평가하는 데 중요한 기준이 된다.

이와 같이, 15.63 Hz의 주파수 해상도는 본 시스템의 목적을 달성하기 위한 충분한 수준이라고 판단되며, 만약 더 높은 주파수 해상도가 필요할 경우, 고성능 프로세서를 활용하거나 샘플 수를 증가시켜 이를 달성할 수 있다.

2.3.2 주파수 범위 설정

신호처리에서 필요한 충돌음과 스키드음의 주파수 범위를 설정하기 위해 주파수 분석을 수행하였다. 이 과정에서는 본 연구에서 녹음한 음성 데이터 분석 이외에도 기존 연구의 데이터 분석 결과를 참고하였다[3]. 참고문헌에서는 실제 교차로 주변에서

음향 정보를 취득하였고 이를 주파수 대역으로 분석하였다. 그 결과 충돌음의 경우 20-10,000 Hz의 대역으로 폭 넓게 신호가 관찰되었으며, 스키드음의 경우 700-2,500 Hz 대역으로 나타났다[3]. 본 연구에서 사용하는 마이크로폰센서 INMP441의 제품 정보에서 제시된 주파수 감지 범위는 60-15,000 Hz이므로 본 연구에서 목적으로 설정한 음향 정보를 충분히 감지할 수 있다. 또한, 충돌음과 스키드음 이외에도 주행음은 일반적으로 평균 20-40 dB에서 강하게 관찰되었으며, 0-3,000 Hz 범위에서 소음이 분포하였다. 반면, 스키드음은 2,000-3,000 Hz의 주파수 범위에서 특정한 패턴을 보였으며, 충돌음은 사고 발생 시 500 Hz 이하에서 특정한 패턴을 보이며 30 dB 이상의 음압 차이가 발생하는 것으로 보고되었다[3].

3. 결과 및 토의

3.1 소음 데이터 수집 및 구성

본 연구에서 사용된 도로 소음 데이터는 유튜브에 공개된 고속도로 주행 영상으로부터 선별된 음원을 기반으로 활용하였다. 다양한 차량 속도, 환경 조건, 사고 유형을 반영할 수 있도록 주행음, 충돌음, 스키드음을 포함한 총 10개의 음원이 선정되었으며, 모두 WAV 형식으로 저장되었다. 음원은 고품질 스피커를 통해 재생된 뒤 외부 소음과 간섭이 차단된 통제된 환경에서 녹음되었으며, 배경 소음을 최소화하고 주요 음향 특성이 명확히 드러나도록 전처리되었다. 이후 이들 음원은 독립 재생 또는 연속 조합 방식으로 구성되어 다양한 사고 시나리오를 모사하였고, 이를 통해 제안한 FFT 기반 소음 분석 시스템의 분류 및 감지 성능을 평가하였다[16].

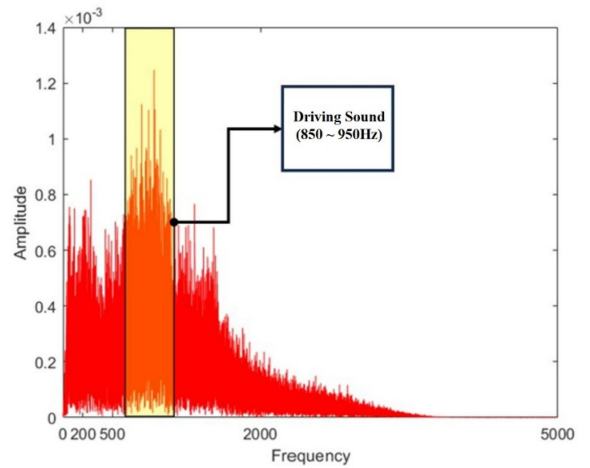
3.2 도로 교통 소음 분석

본 연구에서는 사고 발생에 따른 음향 신호를 분석하기 위해 녹음된 음원과 MATLAB을 활용했다. 음원의 경우 실험 과정에서 실제 스키드음이나 사고음을 재현하기 어렵다는 점을 고려하여 사전에 녹음된 음원을 활용했다. 이에 따라, 실제 사고 현장에서 관찰할 수 있는 음압의 차이는 확인할 수 없었지만 주파수 대역별 진폭 변화를 관찰하여 사고를 인식하는 것을 목표로 하였다. 실제 시험 검증을 위한 프로토타입 제작에서는 앞서 언급한 바와 같이 Arduino와 ESP32, INMP441의 조합으로 음압 차이에 따른 충돌음, 스키드음 인식 가능성을 확인하였다.

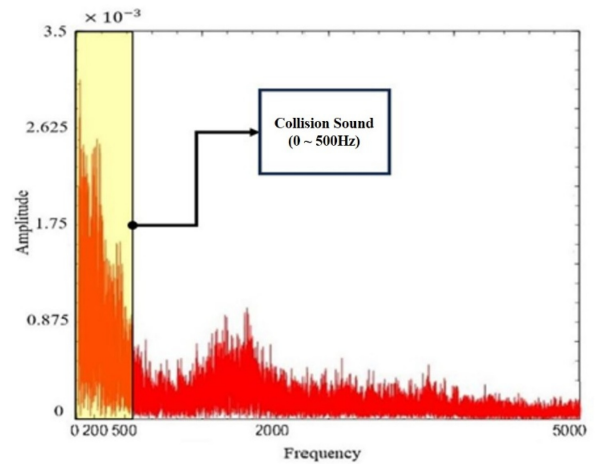
이후 10가지의 주행음, 충돌음, 스키드음 음원을 이용한 실험을 통해 소음 별 주요 주파수 구간을 구하였다.

3.2.1 주행음 분석

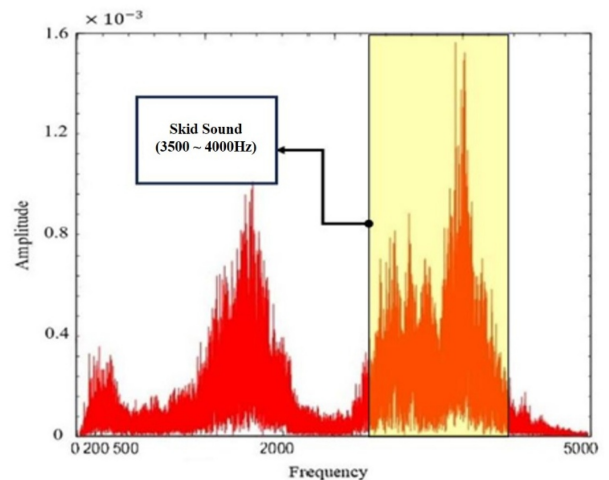
참고문헌에서 주행음 분석 결과로 0-3,000 Hz의 완만한 신호가 확인되었고 특정한 주요 주파수 신호는 확인되지 않았다. 하지만 본 연구의 음원을 이용한 실험 결과, 주행음의 주요 주파수는 Fig. 4(a)와 같이 약 850-950 Hz 대역으로 확인됐으며 마찬가지로



(a) Driving sound frequency using MATLAB



(b) Collision sound frequency using MATLAB



(c) Skid sound frequency using MATLAB

Fig. 4 Frequency analysis using MATLAB

0-3,500 Hz 영역에 완만하게 분포하는 것을 확인하였다. 이는 10차례의 실험에서 반복적으로 확인되었고, 본 연구에서는 비교적 강한 신호가 관찰된 850-950 Hz 영역의 신호를 이용해 다른 음과 구분하였다.

3.2.2 충돌음 분석

참고문헌에 따르면, 차량 간 충돌 시 발생하는 소음은 500 Hz 이하에서 30 dB 이상의 음압 차이를 가진다[3]. 해당 연구에서는 이 음압 차이를 이용해 사고 상황을 실시간으로 감지할 수 있었고, 이는 충돌음의 특성이 사고를 탐지하는 데 중요한 역할을 할 수 있음을 의미한다.

본 연구에서도 마찬가지로 녹음된 음원을 이용해 충돌음을 분석하였고 주요 신호는 Fig. 4(b)와 같이 0-500 Hz에서 관찰하였다. 이는 참고문헌에서 제시한 주파수 범위와 일치하는 결과이다.

3.2.3 스키드음 분석

차량 사고와 관련된 스키드음의 주파수가 1,000-3,000 Hz 범위에 존재한다고 참고문헌에서는 보고한 바 있다. 또한, 참고문헌에서는 음향 인식 기법을 이용하여 스키드음의 주파수를 분석한 결과, 848 Hz에서 가장 강한 신호가 관찰되었다고 보고하였다[3]. 이를 통해, 스키드음의 주요 주파수가 기존에 보고된 주행음 및 충돌음의 주파수와 큰 차이를 보인다는 점을 확인할 수 있으며, 본 연구에서 제안하는 주파수 기반 사고 감지 방식의 실현 가능성을 다시 한번 확인할 수 있다.

사고 감지 방식의 가능성을 보다 명확하게 검증하기 위해, 본 연구에서는 실제 녹음된 스키드음을 직접 분석하여 스키드음의 주파수를 확인하였다. Fig. 4(c)는 본 연구에서 분석한 스키드음의 FFT 결과를 나타낸다. 노란색 음영으로 표시된 부분에서 확인할 수 있듯이, 스키드음 발생 시 3,500-4,000 Hz에서 강한 신호가 검출되었다. 이는 기존 연구에서 보고된 1,000-3,000 Hz 범위보다 다소 높은 주파수 영역이지만, 스키드음의 발생 특성이 타이어의 트레드 패턴, 도로 재질 및 표면 상태에 따라 달라질 수 있다는 점을 고려하면 이러한 차이는 충분히 설명될 수 있다. 결국, 본 연구에서는 제안된 방식의 가능성을 실험을 통해 직접 확인했으며 축소된 크기의 시스템을 제작하여 기능을 구현하였다.

3.3 시스템의 성능 분석 및 실험 결과

본 연구는 고속도로 가로등과 통합된 2차 사고 예방 시스템을 제안하고, 이를 위한 사고음의 감지 가능성과 시스템의 반응성을 실험적으로 검증하였다. 국내 교통법규에는 고속도로 가로등 간격에 대한 명확한 기준이 없으나, 일부 지방자치단체 조례에 따르면 일반적으로 50 m 이내에 설치되는 경우가 많다. 이에 따라, 본 연구에서는 사고음이 발생한 차량과 시스템 간 최대 거리를 25 m로 가정하였다. 충돌음의 평균 음압을 70 dB로 설정하고, 역제곱 법칙을 적용하여 25 m 거리에서 전달되는 음압을 42 dB로 계산하였다. 따라서 시스템에 포함된 마이크로폰은 최소 42 dB 수준의 음을 감지할 수 있어야 한다.

선정한 마이크로폰인 INMP441은 32-94 dB의 감지 음압 범위와 60-15,000 Hz의 주파수 응답 특성을 가진다. 이 범위는 주행음(850-950 Hz), 충돌음(0-500 Hz), 스키드음(3,500-4,000 Hz)을 모두 포함하므로, 해당 마이크로폰은 다양한 사고 관련 소음을 정확히 감지할 수 있다.

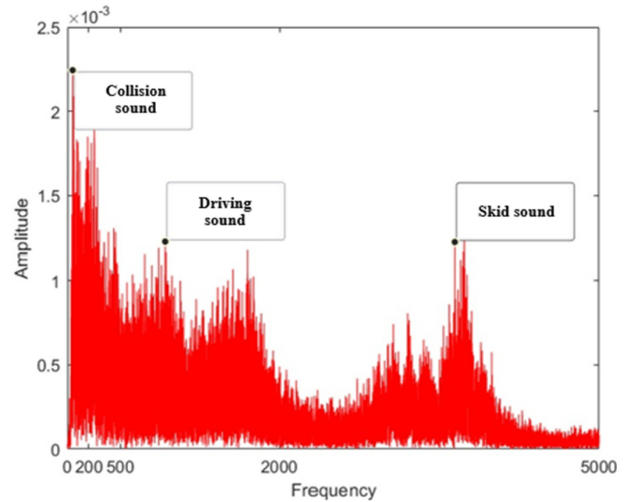


Fig. 5 Total frequency analysis using MATLAB

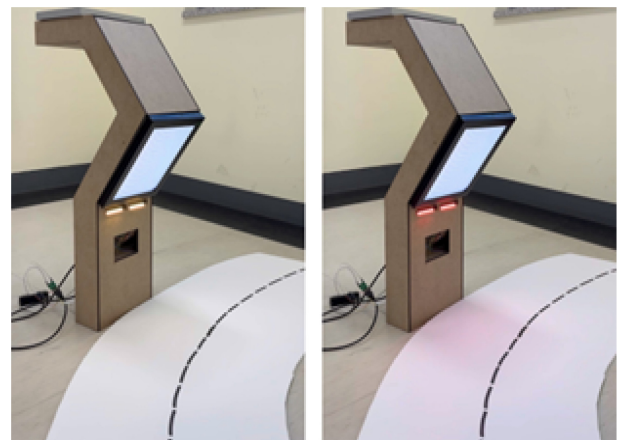


Fig. 6 Accident detection and notification through LED

Fig. 5는 고속도로 환경에서 발생 가능한 여러 소음을 동시에 재생한 후, 마이크로폰으로 수집한 데이터를 FFT하여 분석한 결과를 보여준다. 분석 결과, 각 소음은 고유 주파수 대역에서 명확한 진폭을 보였으며, 개별 음원 분석 결과와 일치하였다. 이를 통해, FFT 기반 소음 분석을 활용한 본 시스템이 사고 상황을 효과적으로 분류할 수 있음을 확인하였다.

요소 기술의 설계 완료 후, 본 연구에서는 Fig. 6에서와 같이 축소형 목업 시스템을 제작하고, 곡선형 고속도로 모형에 설치하여 성능을 실험적으로 검증하였다. 실험은 주행음, 스키드음, 충돌음을 순차적으로 재생하여 시스템 반응을 관찰하는 방식으로 구성되었으며, 마이크로폰의 감지 기준은 42 dB 이상으로 설정하였다.

첫 번째 실험 조건에서는 각 음원(주행음, 스키드음, 충돌음)에 대해 10회씩 반복하여 총 30회의 실험을 수행하였다. 주행음 재생 시 시스템은 반응하지 않았으며, 스키드음(3,500-4,000 Hz) 재생 시에는 노란색 LED가 점멸하며 경고를 표시하였다. 충돌음(0-500 Hz) 재생 시에는 30 dB 이상의 음압이 감지되었고, 빨간색 LED가 점등되어 사고 경고를 시각적으로 제공하였다.

두 번째 실험에서는 서로 다른 10개의 주행음, 스키드음, 충돌음 음원 파일을 활용하여 연속 재생 및 동시 재생 조건에서도 실험을 반복하였다. 그 결과, 주행음(850-950 Hz), 충돌음(500 Hz 이하), 스키드음(3,500-4,000 Hz) 각각의 주파수 대역에서 구분 가능한 진폭 차이가 나타났다. 시스템은 총 10회의 실험 중 8회에서 세 가지 소음을 정확히 분류하고 1초 이내에 경고 신호를 발생하였다. 나머지 2회에서는 충돌음 감지 시 최대 0.5 초의 지연이 발생하였다.

결론적으로, 본 연구는 사고음의 주파수 분석을 기반으로 고속도로에서 발생 가능한 다양한 소음을 정확히 식별할 수 있음을 실험적으로 입증하였다. 제안된 시스템은 고속도로 2차 사고 예방에 효과적으로 기여할 수 있을 것으로 기대되며, 향후에는 감지 정확도 향상을 위한 필터링 기술 고도화, 마이크론 민감도 개선을 포함한 하드웨어 업그레이드, 시스템 소프트웨어의 최적화를 통해 성능을 더욱 향상시킬 계획이다.

3.4 고속도로 적용 설계

본 연구에서는 요소 기술의 설계 및 평가를 수행하고, 소규모 실험을 통해 시스템의 성능을 검증하였다. 이를 바탕으로, 연구의 실용성을 높이기 위해 고속도로 환경에서의 적용 가능성을 고려한 설계를 제안한다.

실제 고속도로에서 사용될 가로등은 Fig. 7과 같이 Sketch-up을 이용하여 설계되었다. 이 가로등은 고속도로 환경에 최적화되어 있으며, 사운드 수집기, 배터리, Arduino 등의 부품이 통합되어 있어 교통사고 발생 시 사고음을 감지하고 경고 신호를 발송할 수 있는 기능을 갖추고 있다. 특히, 태양광 패널과 에너지 저장 시스템(ESS)을 활용하여 친환경적이며 안정적인 전력 공급과 시스템 지속성을 확보하였다. 가로등 상단에는 태양광 패널을 부착하고, 하단에는 ESS를 매몰하여 공간을 효율적으로 활용함으로써 외부 전력망에 의존하지 않고 독립적으로 운영되도록 설계되었다.

설계된 가로등은 태양광 패널과 고휘도 LED를 통합한 형태로, 사고 발생 시 LED 스트립이 점멸하여 시각적 경고를 제공하도록 하였다. 또한, 가로등 기둥에는 빨간색 LED가 점멸하도록 설계하여 주변 차량이 신속하게 사고를 인지할 수 있도록 하였다. 이 LED는 낮과 밤 모두에서 높은 가시성을 제공하며, 실시간 사고 감지 및 경고 시스템의 즉각적인 작동을 지원한다. ESS는 가로등 하부에 매몰되어 외부 환경으로부터 보호되며, 안정적인 전력 공급을 보장한다.

본 시스템은 FFT 기술을 활용하여 사고 소음을 실시간으로 분석하고 신속하게 경고를 전달하는 기능을 갖추고 있다. 또한, 2차 사고 예방을 위해 사고 발생 후 후속 차량이 사고 지점에 도달하기 전에 빠르게 경고를 제공할 수 있으며, 날씨나 환경 조건의 영향을 덜 받는다는 점에서 기존의 영상 및 AI 딥러닝 기반 시스템과 차별화된다[17].

이 시스템은 고속도로뿐만 아니라 교차로, 터널과 같은 다양한 도로 환경에도 적용할 수 있으며, 기존 가로등과의 통합을

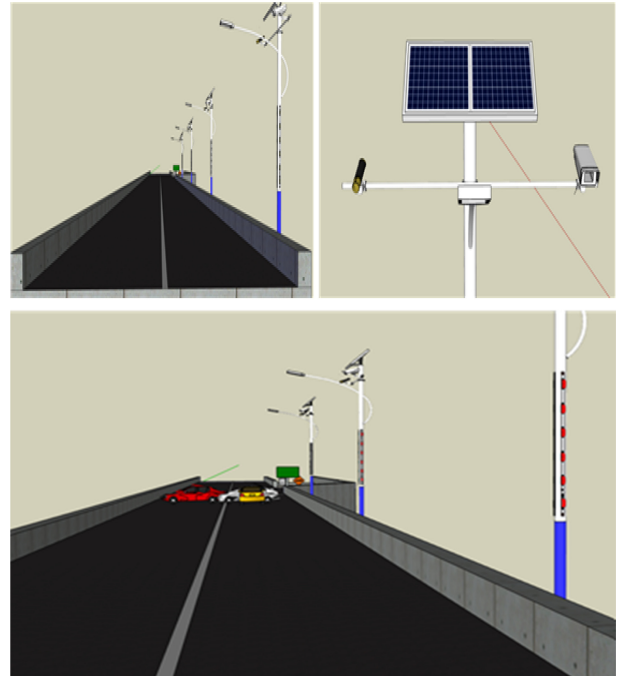


Fig. 7 Highway Street light concept design

통해 교통사고 발생 시 즉각적인 경고가 가능하도록 설계되었다. 이를 통해, 사고 발생 직후 신속한 대응이 가능하며, 2차 사고 예방과 교통사고 확산 예방에 기여할 수 있다.

4. 결론

본 연구는 고속도로에서 발생하는 2차 사고를 예방하기 위해, FFT 기반 소음 분석 기술을 활용한 사고 감지 시스템을 제안하고 이를 설계, 구현하였다. 이를 위해 외관부와 회로부를 각각 설계 및 제작하였으며, MATLAB 기반의 소음 신호처리 분석을 통해 FFT 기법의 적용 가능성을 검증하고, 이를 기반으로 통합 시스템을 완성하였다. 제안된 시스템은 기존의 영상 기반 감지 방식에 비해 신속하고 정확한 반응이 가능하며, 주행음, 충돌음, 스키드음의 주파수 특성을 실시간으로 분석하여 사고 여부를 효과적으로 판단할 수 있다.

실험 결과, 독립적으로 주행음, 충돌음, 스키드음을 재생한 조건에서는 각각 100%의 정확도로 소음을 구분하고 경고 신호를 발생시켰으며, 세 가지 소음이 동시에 재생되는 복합 환경에서도 80%의 정확도로 감지 및 분류가 가능하였다. 특히, 충돌음과 스키드음의 주요 주파수 대역을 정확히 식별하여 각각 빨간색 및 노란색 LED를 통해 후속 차량에 시각적 경고를 제공함으로써, 시스템의 실효성을 확인할 수 있었다. 또한, 태양광 패널과 리튬 이온 배터리를 활용한 자가 전력 공급 방식을 도입하여 외부 전력 없이도 지속적인 운용이 가능하도록 설계하였다.

이러한 결과는 제안한 시스템이 고속도로 환경에서 실시간 사고 감지 및 경고 기능을 효과적으로 수행할 수 있음을 입증하며,

향후 다양한 도로 조건에 적용될 수 있는 기반 기술로서의 가능성을 보여준다. 향후에는 기후 조건, 환경 소음, 지역 특성 등 외부 변수에 대한 추가 실험을 통해 시스템의 범용성과 신뢰성을 강화하고, 감지 성능 향상을 위한 알고리즘 및 하드웨어 보완을 지속적으로 추진할 예정이다.

ACKNOWLEDGEMENT

본 연구는 산업통상자원부(MOTIE)와 한국에너지기술 평가원(KETEP)의 지원을 받아 수행한 연구 과제입니다(No. RS-2024-00394769). 또한 본 연구는 산업통상자원부의 재원으로 한국산업기술진흥원의 지원을 받아 수행한 연구 과제입니다(No. P0024172, 2025년 지역혁신클러스터육성 2기 사업).

REFERENCES

1. Korean National Police Agency, (2023), Status of traffic accidents reported to the police. https://kosis.kr/statHtml/statHtml.do?orgId=132&tblId=DT_V_MOTA_011&conn_path=I2
2. Ahn, S., Lee, J., Chang, I., (2024), Analysis of severity factor of secondary incidents along highway segment, *Journal of the Korea Institute of Intelligent Transport Systems*, 23(6), 28-42.
3. Park, M.-S., Kim, J.-Y., (2006), Acoustic characteristic analysis of the accident for automatic traffic accident detection at intersection, *Journal of the Korea Academia-Industrial cooperation Society*, 7(6), 1142-1148.
4. Road Traffic Safety Authority, (2001), Development of an automatic traffic accident recording device, (Report No. 01-08-407). <https://knpo.police.ac.kr/pds/03%EB%B2%88%20%EC%9D%B4%EC%8B%9C%EB%B3%B5.pdf>
5. Lee, H., Kim, Y., Kwon, T., Park, K., Lee, K., Han, M., (2004), An implementation of traffic accident detection system at intersection based on image and sound, *Journal of Control, Automation and Systems Engineering*, 10(6), 501-509.
6. Kim, B. C., Park, K. H., Han, M. H., (2001), Detection of a traffic accident at a crossroads by the recognition of crash-sound, *Proceedings of the Korean Institute of Industrial Engineers, Spring Joint Conference*, 784-787.
7. U.S. Department of Transportation, (1999), Department of transportation's intelligent transportation systems (ITS) projects book. <https://rosap.ntl.bts.gov/view/dot/2161>
8. Flinsenberg, I. C. M., Ten Kate, W. R. T., (2014), Fall detection system, US8749391.
9. Korea Transportation Safety Authority, (2022), Developing plan for an automated highway traffic safety and accident response based on image recognition technology, (Report No. 11-B552989-000640-01), <https://scienceon.kisti.re.kr/commons/util/originalView.do?cn=TRKO202300003027&dbt=TRKO&m=>
10. Baek, J., Min, J., Namkoong, S., Yoon, S., (2015), An in-tunnel traffic accident detection algorithm using CCTV image processing, *KIPS Transactions on Software and Data Engineering*, 4(2), 83-90.
11. Kim, M.-R., Lee, K.-J., Park, H.-S., (2012), A study on the cases of new renewable energy applied buildings in Korea and Germany-focused on solar and geothermal energy cases, *Journal of the Architectural Institute of Korea Planning & Design*, 28(3), 29-37.
12. Kim, H., Yang, G., Nam, C., Jeong, S., Jung, S. P., (2023), Solar photovoltaic industry in Korea: Current status and perspectives, *Journal of Korean Society of Environmental Engineers*, 45(2), 107-118.
13. Park, S., Park, B., Jeong, H., (2008), Analysis of ae signals on CMP process using FFT method, *Proceedings of the Korean Society of Precision Engineering Conference*, 359-360.
14. Samsung Electronics Co., Ltd., (2012), Method and apparatus for transmitting and processing audio with I2S format, KR20090009656A.
15. Plauska, I., Liutkevičius, A., Janavičiūtė, A., (2022), Performance evaluation of C/C++, micropython, rust and tinygo programming languages on ESP32 microcontroller, *Electronics*, 12(1), 143.
16. Madison Media Software, (2006), Sound forge 8.0 manual. <http://pdf.textfiles.com/manuals/STARINMANUALS/Sony%20Creative%20Software/Manuals/Sound%20Forge%20Audio%20Studio%208.0.pdf>
17. Green, E. R., Agent, K. R., Pigman, J. G., (2005), Evaluation of auto incident recording system (AIRS), (Report No. KTC-05-09/SPR277-03-1F), University of Kentucky Transportation Center. https://uknowledge.uky.edu/ktc_researchreports/156/

**Minki Jung**

B.Sc. in the Department of Mechanical and Automotive Engineering, Kongju National University.

E-mail: nmj0528@naver.com

**Young Shin Cho**

B.Sc. in the Department of Mechanical and Automotive Engineering, Kongju National University.

E-mail: lovedutls123@naver.com

**Yongsik Ham**

Master candidate in the Department of Mechanical Engineering, Kongju National University.

E-mail: gka052812@smail.kongju.ac.kr

**Joong Bae Kim**

Associate Professor in the Department of Mechanical and Automotive Engineering, Kongju National University. His research interest is thermal energy solution.

E-mail: joongbae.kim@kongju.ac.kr