

# 음장 스펙트럼을 이용한 화재감지 방안에 관한 연구

최영우, 박건호, 성승현, 강민영, 한소영, 김경욱, 최승규  
 건양대학교 재난안전소방학과  
 e-mail : skchoi@konyang.ac.kr

## A Study on Fire Detection Method Using Sound Field Spectrum

Young-Woo Choi, Gun-Ho Park, Seung-Hyeon Seong, Min-young Kang,  
 So-Yeong Han, Kyoung-Wook Kim, Seung-Kyou Choi  
 Department of Disaster Safety & Fire fighting, Konyang University

최근 소방청 화재 통계자료에 의하면 화재감지기의 미작동 및 오작동으로 인한 사고가 증가하고 있으며, 이는 화재 초기에 대피할 수 있는 피난 개시시간과 소방대의 화재 출동을 지연시켜 심각한 인명피해와 재산피해를 초래한다. 화재 감지의 미작동 및 오작동으로 인한 사고를 감소시키기 위해서는 화재를 신속, 정확하게 감지할 수 있는 신뢰성 높은 화재감지 방안이 요구된다. 화재감시 공간에 음파를 방사하면 벽, 천장, 바닥 등에서 반사음이 겹쳐 야외에서와는 달리 복잡한 음장이 형성되는데, 기준이 되는 정상시의 음장 스펙트럼과 화재 시의 열, 연기에 의해 연속적으로 출력된 음장 신호 사이의 교차 상관계수를 분석하여 화재를 검출할 수 있다. 이에 본 논문에서는 음장 스펙트럼의 주파수 변화량 및 온도 변화량의 상관관계를 분석하여 화재감지의 미작동 및 비화재보를 감소시킬 수 있는 화재감지 방안과 알고리즘을 제시하고 화재 모의시험을 수행하여 신뢰성과 유용성을 확인한다.

### 1. 서 론

음장(Sound Field)은 소리와 관련한 기술로 음원으로부터 발생하는 음파(Sonic Wave)가 존재하고 전달되는 장소이며, 자유음장(Free Field)과 확산음장(Diffuse Field)이 있다. 자유음장은 음장에서 음파가 자유롭게 펼쳐나갈 수 있는 공간이고, 확산음장은 음파가 모든 방향으로 균일하게 진행될 수 있는 공간이다. 소리는 물체의 진동으로 인한 물리적인 상태변화가 매질을 통하여 전달되는 것으로 고체, 기체, 액체 모두가 매질이 될 수 있고, 이를 통해 음파는 모든 방향으로 퍼져나가고 회절한다[1].

음장을 이용한 화재감지 방안은 화재감시 공간에 음파를 방사하면 벽, 천장, 바닥 등에서 반사음이 겹쳐 야외에서와는 달리 복잡한 음장이 형성되는데, 기준이 되는 정상시의 음장 스펙트럼과 화재시의 열, 연기에 의한 연속적으로 출력된 음장 신호 사이의 교차 상관계수를 분석하여 화재를 검출한다.

최근 소방청 자료에 따르면 2014년 이후 전체 신고 출동 횟수는 5년간 610,903건으로 감지기 오작동에 의한 비화재보 등으로 오인 출동한 건수는 394,373건으로 전체의 64.6%로, 매우 높게 나타나고 있으며 매년 증가하고 있다[2,3].

또한, 소방청의 2021년 자동화재탐지설비 작동 여부별 화

재현황에서 화재감지기 미작동으로 인한 58명의 인명피해와 8,749,071 천원의 큰 재산피해액이 발생되어 신속하고 정확한 화재감지기의 필요성이 대두되고 있다[5,6,7].

이에 본 논문에서는 화재감지기의 미작동 및 비화재보로 인한 피해를 줄이기 위하여 음장스펙트럼을 이용한 화재감지 방안을 제시하고 화재시험을 수행하여 음장 화재감지의 신뢰성과 유용성을 확인한다.

### 2. 화재감지기의 미작동 및 비화재보 사례분석

최근 2022년 소방청 통계연보 중 연도별 화재출동 현황에 따르면, 표 1과 같이 비화재보에 대한 출동 건수가 매년 증가하는 추세를 보이고 있으며, 특히 2020년과 2021년 사이에서는 약 2.4배로 급증하고 있다[7,8,9].

[표 1] 2016-2021 비화재보에 의한 출동(건)

년도 항목	2021	2020	2019	2018	2017	2016
비화재보 출동	92,866	38,119	25,020	20,445	14,447	7,347

또한 2021년도부터 최근 6년간 자동화재탐지설비의 미작동으로 인한 인명 및 재산피해는 표 2과 같이 해마다 증가하고 있다[10,11,12].

[표 2] 자동화재탐지설비 미작동시 인명 및 재산피해(명, 백만원)

년도 항목	2021	2020	2019	2018	2017	2016
인명	58	118	58	96	58	61
재산	8,749	6,409	7,872	4,234	16,279	4,280

소방대의 비화재보와 미작동으로 인한 출동은 소방력의 공백이 발생하기 때문에 신속한 대처를 할 수가 없는 문제점이 발생한다. 또한 표 3와 같이 화재도착 시간대 별 인명피해 현황을 분석 하면 2분정도 도착시간이 지연됐을 때 최소 1.6배 이상의 인명피해가 증가한다[13,14,15].

[표 3] 2016-2021 화재현장도착 시간대 별 인명피해 현황(건)

년도 시간	2021	2020	2019	2018	2017	2016
3분 이내	336	352	442	611	377	315
5분 이내	801	817	974	990	846	827

따라서 소방대의 원활한 운용을 위해 화재감지기의 지연작동 및 비화재보에 대한 한계점을 개선하여 신뢰성이 높은 화재감지 방안이 요구된다.

### 3. 음장 스펙트럼을 이용한 화재감지 방안

#### 3.1 음장 스펙트럼의 화재감지 특성

음장 스펙트럼을 이용한 화재 감지는 주변 공기의 온도 변화에 따른 공기밀도와 음파의 속도 변화가 음파의 전달에 영향을 주어 유발되는 화재 감시 공간 내부의 음장의 변화를 검출하여, 불꽃이나 연기가 눈에 보이지 않는 상태에서도 조기에 화재를 감지할 수 있는 방안이다.

음장 변화 감지 기반의 화재 감시 방안은 음향 발생 장치가 정해진 공간 내에서 입력 전압에 따라 음파를 출력하고 음향 수신 장치가 공간 내에서 음파를 수신한 음파로부터 음압을 수신한다. 화재 감시 장치가 준비 모드에서 음향 발생 장치의 입력 전압 대비 음향 수신 장치에 의해 얻어진 음압의 비율을 나타내는 음향 전달함수인 식 1을 이용하여 기준 음압 정보를 산출한다.

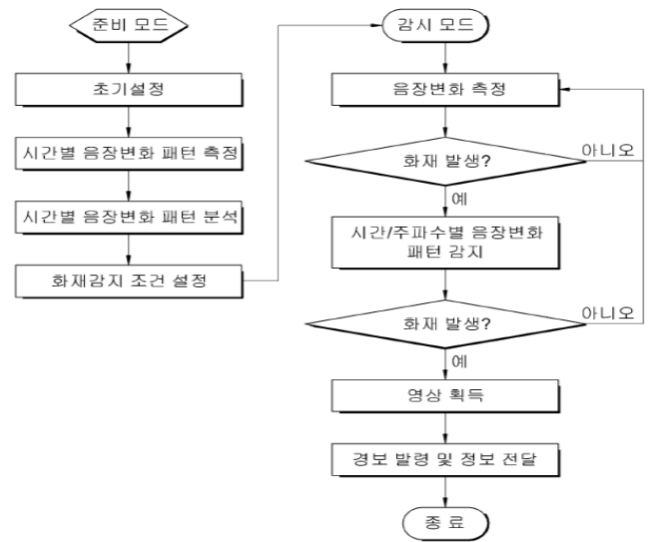
$$R_{i,j}(m) = \frac{\sum_{n=1}^{N-m} (S_j(n+m) - \text{mean}(S_j))(S_j(n) - \text{mean}(S_j))}{\sqrt{\sum_{n=1}^N (S_j(n) - \text{mean}(S_j))^2} \sqrt{\sum_{n=1}^N (S_j(n) - \text{mean}(S_j))^2}}, m \geq 0$$

$$R_{i,j}(m) = R_{j,i}(-m), m < 0 \tag{1}$$

여기서,  $R_{i,j}$ 는,  $i$ 번째 측정된 음장  $S_i$ 와  $j$ 번째 측정된 음장  $S_j$  상호 간의 교차 상관계수,  $N$ 은 멀티톤 음원의 채널 수,  $m$ 은 주파수 이동 값의 한 단위로서 멀티톤 음원의 이웃한 주파수 간극이다. 이러한 음향 전달함수를 이용하여 화재 감시 장치가 감시 모드에서 현재 음압 정보를 계산한 후, 음압 정보와 현재 음압 정보를 비교하여 화재 발생 여부를 확인한다.

#### 3.2 음장 스펙트럼의 화재 감지 알고리즘

음장 스펙트럼을 이용한 화재 감지 알고리즘을 단계별로 제시하면 그림 1과 같이 준비 모드와 감시 모드로 나뉘고 준비 모드는 초기설정 단계, 시간별 음장변화 패턴 측정 단계, 시간별 음장변화 패턴 분석 단계 및 화재 감시 조건 설정 단계를 감시 모드는 음장변화 측정 단계, 화재 발생 판단 단계, 시간/주파수별 음장변화 패턴 감지 단계, 화재 발생 확인 단계, 영상 획득 단계 및 경보 발령 및 정보 전달 단계이다.



[그림 1] 음장 스펙트럼을 이용한 화재 감지 알고리즘

구체적으로 설명하면

[Step1] 초기설정 단계에서는 정해진 공간 내에서 음향 발생 장치가 ON되어 입력 전압에 따라 음파를 출력하고 음향 수신 장치가 ON되어 음파를 수신하며, 화재 감시 장치가 음향 발생 장치의 입력 전압 대비 음향 수신 장치에 의해 얻어진 음압의 비율을 나타내는 음향 전달함수를 이용하여 기준 음압정보, 주파수별 기준 음압 정보의 평균 및 편차를 계산 및 저장한다.

[Step2] 시간별 음장변화 패턴 측정 단계에서는, 화재 감시 장치가 음향 전달함수를 이용하여 현재 음압 정보, 주파수별 현재 음압 정보의 평균 및 편차를 계산하고, 현재 음압 정보, 주파수별 현재 음압 정보의 평균 및 편차를 기준 음압 정보, 주파수별 기준 음압 정보의 평균 및 편차와 각각 비교하여 시간별 음장변화 패턴을 측정한다.

[Step3] 시간별 음장변화 패턴 분석 단계에서는, 화재 감시 장치가 측정된 시간별 음장변화 패턴을 분석한 후, 시간별 음장변화 지수 값을 저장한다.

[Step4] 화재감시 조건 설정 단계에서는 화재 감시 장치가 저장된 시간별 음장변화 지수 값을 참조하여 초기화 시간 주기 및 화재 판단 기준 값을 설정한다.

[Step5] 음장변화 측정 단계에서는, 화재 감시 장치가 음향 전달함수를 이용하여 현재 음압 정보, 주파수별 현재 음압 정보의 평균 및 편차를 계산한다. 이때, 화재 감시 장치는 초기화 시간 주기 간격으로 초기화 시간 주기 및 화재 판단 기준 값을 재설정할 수 있다.

[Step6] 화재 발생 판단 단계에서는, 현재 음압 정보, 주파수별 현재 음압 정보의 평균 및 편차를 기준 음압정보, 주파수별 기준 음압 정보의 평균 및 편차와 각각 비교하여 화재 발생 여부를 판단한다. 자세하게는 화재 감시 장치는 초기편차 대비 음압 정보 변화율(S/N)의 평균값이 화재 판단 기준 값 이상인 경우, 화재가 발생한 것으로 판단한다.

[Step7] 시간/주파수별 음장변화 패턴 감지 단계에서는, 화재가 발생한 것으로 판단된 경우, 화재 감시 장치가 시간/주파수별 음장 변화 패턴을 감지한다.

[Step8] 화재 발생 여부 확인 단계에서는, 화재 감시 장치가 감지된 시간/주파수별 음장 변화 패턴을 기저장된 시간/주파수별 음장 변화 패턴과 비교하여 음장 변화가 화재에 의한 것인지 또는 침입 등과 같은 기타 이벤트에 의한 것인지 확인한다.

[Step9] 영상 획득 단계에서는, 화재가 발생한 것으로 확인된 경우, 화재 발생 여부를 다시 한 번 확인하기 위해 카메라가 영상 촬영을 수행한다.

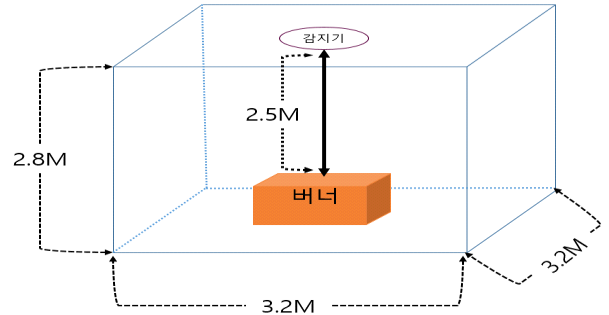
[Step10] 경보 발령 및 정보 전달 단계에서는 화재 감시 장치가 화재 경보를 발령하고, 카메라를 이용하여 촬영된 영상을 유무선 통신망을 이용 서버로 전송한다.

#### 4. 음장 스펙트럼을 이용한 화재감지 시험

##### 4.1 시험조건 및 시험방법

음장 스펙트럼 이용한 화재 감지 방안의 신뢰성을 확인하기 위하여 그림 2와 같이 특정 공간에서 음장 센서와 발화원(버너)의 약 2.5m 거리에서 스피커에 의해 발생 되는 소리로

음장을 형성시키고 이를 마이크로 수음하여 데이터로 축적하고 VOC+Co2 센서가 동작중인 상태에서 화재 시험(부탄가스 발화)을 실시하고 제시한 알고리즘으로 연산처리 및 분석을 수행하여 화재 감지 성능을 평가한다.



[그림 2] 음장 스펙트럼을 이용한 화재감지 시험

시험조건은 조명을 제외한 냉난방기 및 공조기의 전원을 모두 차단하고, 30초 이상 음장 안정화 시간 이후 시험 주파수는 4000hz, 8000hz, 16000hz, 18000hz을 사용한다. 한편, VOC + Co2 정상 동작인 값은 eCO2= 413~450ppm, TVOC = 1~10ppb 이다.

시험단계는 첫 단계로 시험장소의 설치 가능 위치에 시험 대상 기기를 설치 후 공간 외부에서 노트북을 사용하여 시험 대상기와 유선 랜 또는 무선 와이파이 방식으로 연결 후 음장센서 시스템이 정상적으로 작동하는지 확인한다. 두번째 단계는 시험 대상 기기의 정상작동 확인하고 VOC + Co2 안정화 이후 화원(버너)를 설정된 시간 조건에 맞추어 점화하여 화재 감지 알람 여부를 확인한다.

##### 4.2 시험결과 및 분석

시험 결과는 표 5과 같이 주파수별로 3회 화재 감지 테스트를 실시 한 결과, 모두 화재 감지에 성공하였다.

[표 5] 시험 결과

hz	시험항목	총 시험 횟수	감지 성공 횟수	감지율 (%)
4000	음장센서 화재	3	3	100
	VOC + Co2 화재	3	3	100
8000	음장센서 화재	3	3	100
	VOC + Co2 화재	3	3	100
16000	음장센서 화재	3	3	100
	VOC + Co2 화재	3	3	100
18000	음장센서 화재	3	3	100
	VOC + Co2 화재	3	3	100

한편, 화재 감지에 대한 성공 횟수를 기준으로 한 감지율을 식 2로 산정한다.

$$\text{감지율}(\%) = \frac{\text{감지 성공 횟수}}{\text{총 시험 성공 횟수}} \times 100 \quad (2)$$

시험 결과를 분석하면 4000hz 음장센서와 이산화탄소센서 화재감지 시험에서 총 시험 횟수 3번, 감지 성공 횟수 3번으로 감지율이 100%이고, 이와 동일하게 8000hz, 16000hz, 18000hz 시험에서도 감지율이 100%로 우수한 화재 감지 성능이 있음을 확인하였다.

또한 상기 화재 시험으로 본 논문에서 제시한 음장 스펙트럼을 이용한 화재 감지 방안과 알고리즘이 적용된 감지기가 신속하고 정확하게 화재를 감지하여 신뢰성이 높음을 확인하였다.

## 5. 결 론

본 논문에서는 화재감지기의 지연작동 및 비화재보로 인한 피해를 줄이기 위하여 음장 스펙트럼을 이용한 화재감지 방안을 제시하고 화재시험을 수행하여 음장 화재감지기의 신뢰성과 유용성을 확인하였다. 주요 연구성과와 기대효과를 요약하면 다음과 같다.

(1) 화재에 의한 주변 공기의 온도 변화에 따른 공기밀도와 음파의 속도 변화가 음파의 전달에 영향을 주어 유발되는 화재 감시 공간 내부의 음장의 변화를 감지함으로써, 불꽃이나 연기가 눈에 보이지 않는 상태에서도 조기에 화재를 감지할 수 있음을 확인하였다.

(2) 향후, 기존 화재감지기의 성능과 기능을 개선한 음장 스펙트럼 기반의 화재감지기가 오작동/미작동 확률을 줄일 수 있고, 사각지대에서 발생하는 초기 화재를 감지하여 대형 인명 및 재산피해 예방에 기여할 수 있기를 기대한다.

## 참고문헌

- [1] 김황준, 확산음장으로 체화된 인지표상의 개발, 공학박사 학위논문, p1-84, 2019.06
- [2] 국내·외 비화재보의 통계 및 관리체계에 관한 연구 - 황의홍·이성은\*·최돈목, pp.1-2, 2020
- [3] 2021 화재통계연감, pp.144
- [4] 소방청 통계연보, 연도별 119생활안전 출동 현황, 2-2-4-2, 2022
- [5] 화재통계연감, 자동화재탐지설비 작동 여부별 화재현황, 2016-2021
- [6] 화재통계연감, 화재현장도착 시간대별 인명피해 현황, 2016-2021
- [7] 한지우, 건축물 화재사례 및 화재위험성 분석을 통한 방화구획 기준 개선방안에 관한 연구, 학위논문자료 p1-132, 2019
- [8] 이정배, 초고층빌딩 통합 화재방재시스템 설계 및 구현에 관한 연구, 한국산학기술학회논문지, pp39-47, 2022.02
- [9] 채수복, 입체 음향 저작도구를 위한 3D 음장재현 시스템 구현의 관한 연구, 석사학위청구논문, p22, 2002.01
- [10] 정원일, 주택화재에서 주거지 유형별 재산피해에 영향을 미치는 화재인자 영향분석에 관한 연구, 한국산학기술학회논문지, pp. 597-607, 2022.02
- [11] 이수상, 우리나라 비화재보 방지를 위한 연기감지기 개선방안에 관한 연구, 석사학위논문, p1-60, 2015.12
- [12] 송봉세, 국내 공동주택 화재감지시스템의 성능개선을 위한 기초연구, 한국산학기술학회논문지, p533-538, 2014
- [13] 조성우, 정순규, 손지민, 김현탁, 임계온도스위치를 이용한 저전력 단독경보기형 정온식 감지기 개발, 한국화재소방학회 논문지, p70-76, 2019
- [14] 서병근, 소방시설 관리 개선을 위한 IOT기반의 원격감지시스템 구축에 대한 연구, 재난과학박사 박사학위논문, p1-197, 2017
- [15] 박수진, 화재감지기의 비화재보 저감을 위한 실태 및 유지관리에 관한 연구, 석사학위논문, p1-61, 2022.2

### 감사의 글

본 연구는 교육부와 한국연구재단의 재원으로 지원을 받아 수행된 3단계 산학협력 선도대학 육성사업(LINC 3.0)의 연구결과입니다(NTIS 과제번호. 1345356198).