

[Research Paper]

음파 소화기를 이용한 안전 스토브 시스템 개발

서윤원 · 이석재 · 박형주 · 김기남 · 최용래 · 황형준 · 한승한* · 심동하**†

서울과학기술대학교 MSDE전공 학생, *서울과학기술대학교 스마트생산융합시스템공학과 학생,
**서울과학기술대학교 MSDE전공 교수

Development of Safe Stove System using Sound Wave Fire Extinguisher

Yunwon Seo · Sukjae Lee · yungjoo Park · Kinam Kim · Yongrae Choi ·
Hyungjun Hwang · Seunghan Han* · Dongha Shim**†

Student, MSDE Programme, SeoulTech, *Student, Dept. of MSDE, SeoulTech, **Professor, MSDE Programme, SeoulTech

(Received September 14, 2018; Revised October 16, 2018; Accepted October 29, 2018)

요 약

본 논문에서는 최초로 음파 소화기를 이용한 자동 화재진압 기능을 가진 안전 스토브 아키텍처를 제안하고 개발하였다. 화재가 발생하면 화재 센서와 연동된 마이크로컨트롤러가 화재를 감지하고 음파 소화기를 구동하여 화재를 진압하는 구조를 가진다. 음파 소화기는 스피커와 콜리메이터로 구성되며, 오디오 증폭기를 포함하는 구동모듈에 의해 구동된다. 스토브를 둘러싸는 인클로저를 사용해 거리에 따른 음파의 확산을 막아 음파의 감쇠를 줄일 수 있었다. 이때, 사용된 음파의 주파수는 50 Hz이며, 음압은 소화기로부터 0.5 m 거리에서 93 dBA로 측정되었다. 7 cc 및 14 cc의 가연성 액체에서 발생한 화염에 대해 진화에 소요되는 시간은 각각 최대 8 s와 15 s로, 각각 자연소화 시간의 24%와 42%에 해당한다. 제안된 안전 스토브는 기존 안전 스토브와 비교하여 무해하고 잔여물질이 남지 않기 때문에, 다양한 가전기기에 적용되어 원활한 초기 화재 진압 및 화재 확산 방지에 기여할 것으로 기대된다.

ABSTRACT

In this paper, the architecture of a safe stove with an automatic fire suppression function using a sound wave fire extinguisher has been proposed and developed for the first time. A microcontroller connected to a fire sensor detects and suppresses a fire by driving a fire extinguisher. The sound wave fire extinguisher is composed of a speaker and collimator, and is driven by a driver module including an audio amplifier. The attenuation of the sound wave is reduced by preventing the sound diffusion with an enclosure surrounding a stove. The frequency of the sound wave is set to 50 Hz, and the sound pressure of 93 dBA is measured at the distance of 0.5 m. It takes maximum 8 and 15 seconds to suppress the flame from 7-cc and 14-cc flammable liquid, respectively, which corresponds to 24% and 42% of the natural extinguishing time. Since the proposed safe stove is non-toxic and leaves no residues over the conventional ones, it would combine with various home appliances to suppress early-stage fires and prevent fire expansion.

Keywords : Safe stove, Sound fire extinguisher, Fire sensor, Microcontroller

1. 서 론

안전 스토브 시스템(safe stove system)은 화재 발생 시 센서가 화재를 감지하여 자동으로 소화기가 작동하여 조리중 발생한 화재를 진압하는 시스템이다. 실제로 분말 소화기를 스토브 상부에 배치한 스토브 시스템이 상용화되어 가

정에 적용되고 있다⁽¹⁾. 분말 소화기의 분말소화약제(제1종)가 불과 접촉하여 두 차례의 열분해 과정을 통해 냉각소화 작용이 나타난다. 열분해 생성물인 수증기 기체와 이산화탄소는 대기 중 산소 농도를 낮추어 질식소화효과를 나타내고, 화원으로부터 주위로 발산되는 열전달을 차단하는 작용을 한다. 열분해 과정에서 생성된 나트륨이온은 연쇄

† Corresponding Author, E-Mail: dongha@seoultech.ac.kr, TEL: +82-2-970-7287, FAX: +82-2-974-5388

© 2018 Korean Institute of Fire Science & Engineering. All right reserved.

반응 활성체인 수산기와 반응하여 이를 제거함으로써 부족 때 소화작용을 나타낸다⁽²⁾. 이러한 분말소화약제는 인체에 유해하고 잔여물질을 남기며, 적절히 관리되지 않으면 고형화로 인해 화재 발생시 미동작 가능성을 가지고 있다⁽²⁾.

음파가 화염에 영향을 미치는 현상의 발견은 1857년으로 거슬러 올라간다⁽³⁾. 아일랜드 과학자 John Tyndall은 음파로 불꽃을 진압할 수 있는 것을 발견하였고, 그의 연구는 이후 제트 엔진 연소, 로켓 추진체 등 많은 다른 연구들로 이어졌다^(4,7). DARPA는 2008년 USS George Washington 선상 화재 사건 이후 작은 공간의 화재 진압 연구를 위한 “Instant Fire Suppression” 프로그램을 시작한다⁽⁸⁾. DARPA는 연구를 통해 두 가지 원리가 음파 소화에 중요한 역할을 하는 것을 밝혀냈다. 첫째는, 음파에 의해 가속된 공기의 속도가 화염 경계층을 얇게 만들어 화염이 유지되는 것을 어렵게 만든다. 두 번째는 음파가 화염 표면을 교란시켜 연료의 증발을 유도해 화염의 범위를 넓게 만들어 전체 화염의 온도를 낮춘다는 것이다. 특히 음파 소화기는 우주선이나 잠수함과 같이 오염이 문제가 되는 좁고 밀폐된 공간에서 큰 장점을 가질 수 있다⁽⁹⁻¹⁰⁾.

본 논문에서는 기존 분말 소화기 기반의 안전 스토브의 문제를 해결하기 위하여 음파 소화기를 이용한 안전 스토브 시스템을 제안하였다. 음파소화기 기반의 제안된 안전 스토브 시스템은 인체에 무해하며 오염의 걱정이 없고 관리가 용이한 장점을 가진다. 음파소화기, 화재 센서, 마이크로컨트롤러를 연동한 단순한 구조의 안전 스토브 시스템을 설계하고 구현한 후, 가연성 액체를 이용한 소화 실험을 통해 동작을 검증하였다.

2. 본 론

2.1 안전 스토브 시스템 설계

Figure 1은 제안된 음파 소화기를 사용한 안전 스토브의 아키텍처 및 동작원리를 보여준다. 마이크로컨트롤러(microcontroller ⑨)는 화재 센서(fire sensor ⑧)를 통해 화재를 감지하고 신호를 마이크로컨트롤러로 전달한다. 마이크로컨트롤러는 220 V-AC 전원(⑩)과 AC-DC 변환기(AC-DC converter ③) 사이에 위치한 스위치(switch ②)를 ON 시켜 오디오 증폭기(audio amplifier ④)의 DC전원을 공급하고, 듀티비(duty ratio)가 50%인 Pulse Width Modulation (PWM) 신호를 발생시켜 오디오 증폭기의 입력단에 공급한다. 마이크로컨트롤러가 오디오 증폭기의 입력 신호를 직접 생성하기 때문에 별도의 신호원을 사용하지 않는 단순한 구조를 가진다. 선행연구에 따르면 음파의 주파수가 100 Hz 이하의 저주파 영역에서 소화 효과가 높으며, 본 논문에서는 50 Hz의 PWM 신호를 사용 하였다⁽¹⁰⁻¹²⁾. 과전류로부터 AC-DC 변환기를 보호하기 위해 220 V-AC 전원과 스위치(switch) 사이에 차단기(circuit breaker ①)를 설치하였다. 스위치는 화재 발생시에만 AC-DC 변환기에 전원을 공급하도록 AC-DC

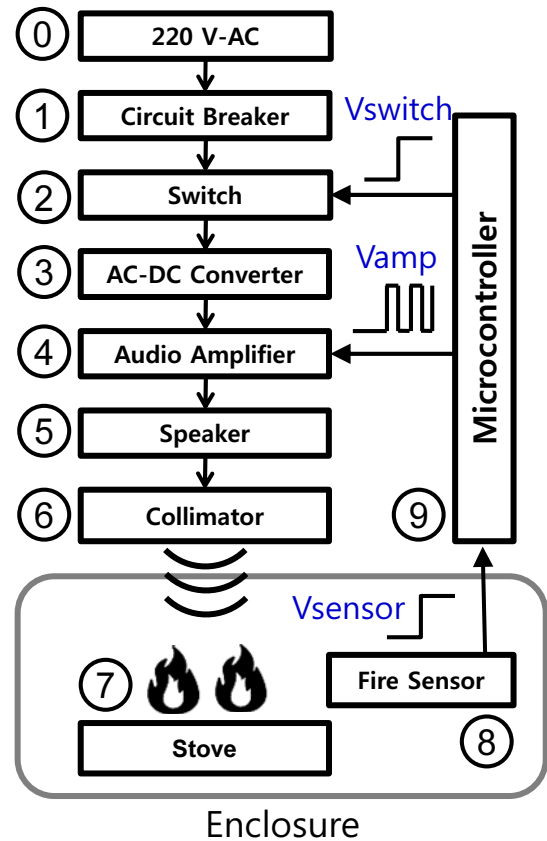


Figure 1. Architecture of the proposed safe stove using a sound wave fire extinguisher.

변환기의 전단에 배치해 대기 전력소모를 줄였다. 오디오 증폭기를 통해 증폭된 PWM 신호는 스피커(Speaker ⑤)를 구동하고 발생된 음파는 콜리메이터(collimator ⑥)를 통해 전달되어 화재를 진압하게 된다. 콜리메이터는 스피커에서 발생된 음파가 효과적으로 먼 거리까지 전파될 수 있도록 도와준다. 인클로저(enclosure)는 음파의 확산을 막아 거리에 따른 음파의 감쇠를 줄이는 역할을 한다. 화재가 일정시간(약 10 s) 이상 화재 센서를 통해 감지되지 않으면 안전 스토브 시스템은 동작을 멈춘다.

2.2 안전 스토브 시스템 구현

Figure 2는 안전 스토브에 탑재된 소화기의 구조와 사진을 보여준다. 음파 소화기에는 150 W(RMS)-8 ohm 사양의 스피커(Marshall, 10A-1565P)가 탑재되었다. 스피커의 지름은 약 26 cm (10 inch) 이다. 콜리메이터는 길이 21 cm의 원통형 플라스틱 용기로 구현되었으며, 스피커 반대쪽 면에 직경 2.5 cm의 원형 홀(hole)이 형성되어 있다. 원형 홀은 볼텍스 링(vortex ring)을 유도해 음파가 더 멀리까지 전달될 수 있도록 한다⁽¹³⁾.

음파 소화기의 구동모듈(driving module)은 Figure 3과 같다. AC-DC 변환기(③Mean Well, NES-350-48)는 220 V-AC 전원을 48 V-DC로 변환하며 정격용량은 350 W이다. 출력

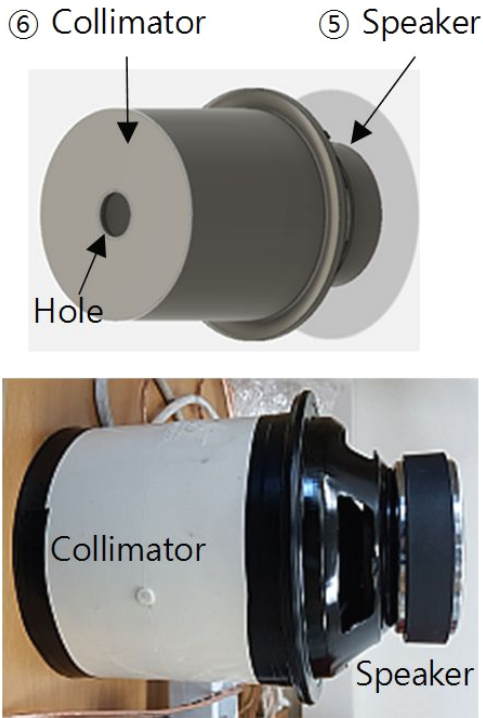


Figure 2. Sound wave fire extinguisher module.

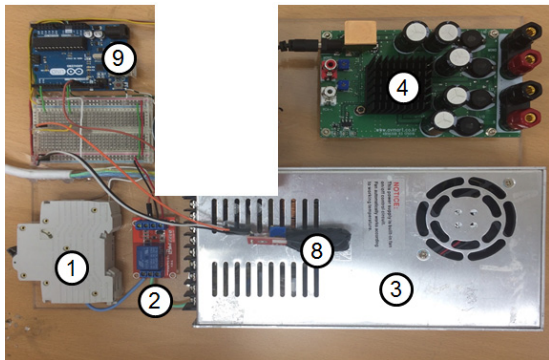


Figure 3. Driver module for the sound wave fire extinguisher.

전압은 가변저항으로 조절이 가능하며 약 40 V로 세팅되었다. 오디오 증폭기(④Kbell, BTL 5630ST)는 저잡음 전증폭기(pre-amplifier)와 Semi-fixed variable resistor (SVR)을 내장한 300 W 용량의 Class-D 증폭기 모듈을 사용하였다. 오디오 증폭기를 과전류로부터 보호하기 위한 차단기(①LSIS, BK63H)의 전류용량은 4 A이다. 마이크로컨트롤러(⑨Arduino UNO)는 화재 감지를 위한 화재 센서(⑧KY-026)와 스위치(②Songle, SDR-05VDC-SL-C)에 연결된다. 적외선(IR) 기반 화재 센서의 측정각도는 60도이며, 모듈에 부착된 가변저항을 조정해 거리를 조절할 수 있다.

음파가 전달되는 과정에서 확산에 의한 음압의 감쇠를 줄이기 위해 인클로저 내부에 스토브를 배치하고, 음파 소화기와 구동모듈을 외부에 배치하였다. 인클로저는 종이박스(35 × 34 × 80 cm)로 만들어 졌으며 화염으로부터 보호

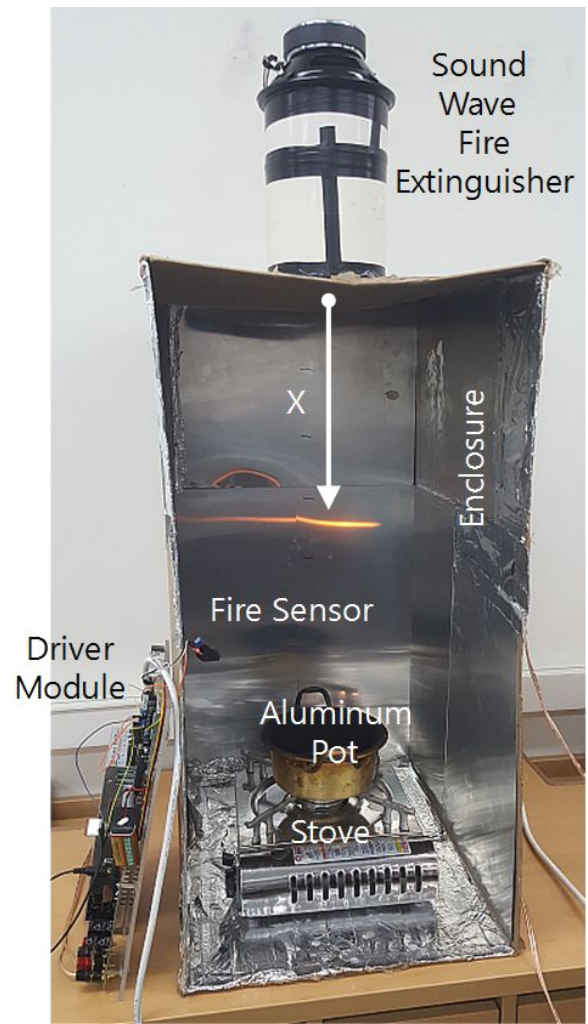


Figure 4. Implemented safe stove with the sound wave extinguisher.

하기 위해 내부에 알루미늄 포일(aluminum foil)을 부착하였다. Figure 4는 조립된 안전 스토브 시스템을 보여준다. 양은용기(aluminum pot)와 스토브가 인클로저 내부에 배치되었다. 양은용기의 직경은 18 cm 이며 높이는 7 cm이다.

인클로저 내부의 음압(sound pressure)의 세기(intensity) 분포와 인클로저 크기가 음파 세기에 미치는 영향을 분석하기 위하여 Roomsim을 이용한 시뮬레이션을 수행하였다. Roomsim은 간단한 직육면체 모양 공간의 음향 분석을 위한 Matlab 기반의 프로그램이다⁽¹⁴⁾. 시뮬레이션에 사용된 구조물은 Figure 5와 같다. 음파의 방사를 모사하기 위해 개방면(Z = 0.2)의 표면흡수계수(surface absorption coefficient)는 1.0로 설정되었고, 나머지 폐쇄면(5개)의 표면흡수계수는 0.05로 설정되었다. 소스(source)와 수신기(receiver)는 각각 음파의 발생 위치와 검출 위치에 배치된다. 해석의 편의를 위해 인클로저의 크기는 실제 크기와 유사한 40 × 40 × 80 cm로 설정되었다. Figure 6은 시뮬레이션 결과를 보여준다. 위치에 따른 인클로저 내부 음압의 세기 변화(intensity variation)는 2.5 dB 이내로, 위치의 영향을 크게 받지 않는

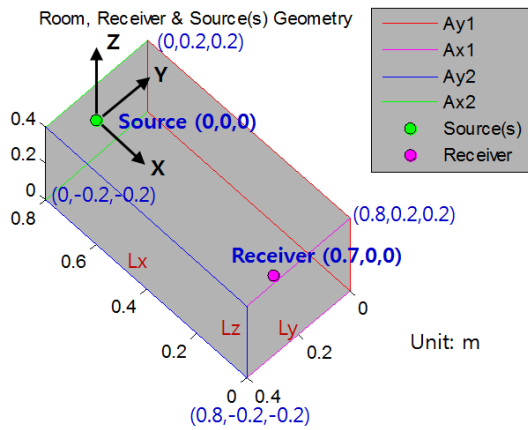


Figure 5. Roomsim simulation structure.

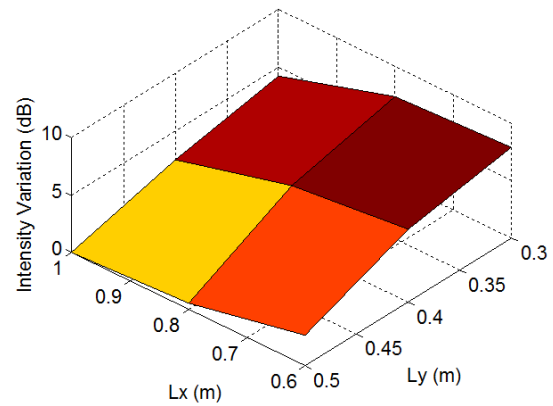


Figure 7. Intensity variation of the received sound wave for the various width and height dimensions.

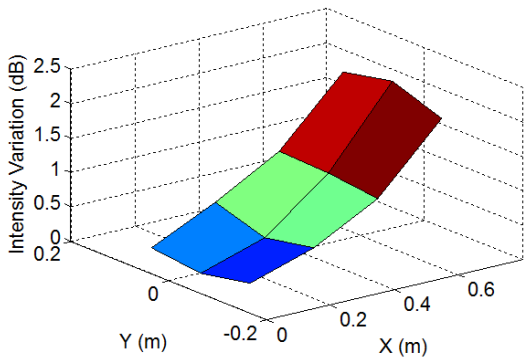


Figure 6. Intensity variation of the received sound wave for the various position inside the enclosure ($Z = 0$).

것을 알 수 있다. 인클로저의 치수가 음파의 세기에 미치는 영향을 분석하기 위하여 높이(Lx)와 폭(Ly)를 변화시키며 시뮬레이션을 실시하였다 (Lz = 0.4 m). Figure 7과 같이 Lx가 1.0 m에서 0.6 m로 감소하면서 음파의 세기가 약 3-4 dB 증가하였고, Ly가 0.5 m에서 0.3 m로 감소하며 약 4-7 dB 증가하였다. 이것은 높이와 폭이 작을수록 개방면의 크기가 감소함에 따라 대기 중으로 방사되는 음파의 손실이 감소되어 전달되는 음압의 세기가 증가하는 것으로 해석될 수 있다. 따라서 인클로저는 사용 편의성의 저해나 열에 의한 음파 소화기의 성능 열화를 유발하지 않는 범위에서 가능한 작게 설계 되어야 한다.

2.3 실험 결과

오디오 증폭기의 PWM 입력신호(Vamp)를 구현하기 위해 마이크로컨트롤러에 탑재된 ATmega328 마이크로컨트롤러의 TIMER/COUNTER 기능을 이용하여 듀티비 50%의 50-Hz (주기 20 ms) PWM 신호를 생성하였다. 따라서 별도의 신호원을 사용하지 않기 때문에 구조가 단순하고 비용을 줄일 수 있는 장점이 있다. AC-DC 변환기에 의해 오디오 증폭기에 인가된 DC전압과 전류는 각각 38.5 V와 3.3 A로 측정되어 오디오 증폭기 동작시 소모전력은 127.5 W로 계산된다.

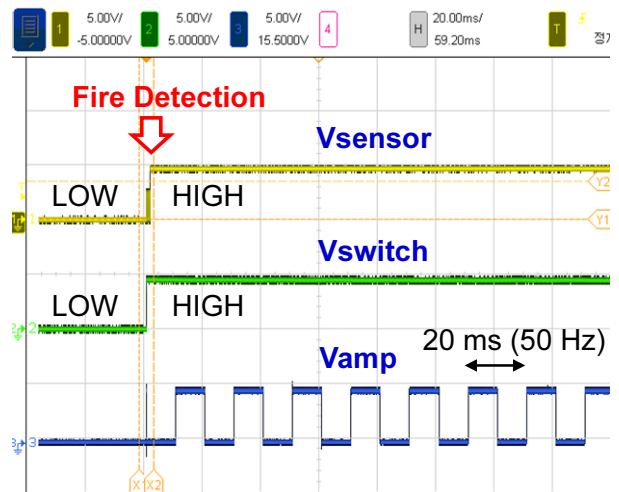


Figure 8. Measured voltage waveforms when the fire is detected.

Figure 8은 화재 감지 전후 오실로스코프(Agilent, MSOX4024A)로 측정된 마이크로컨트롤러의 입출력 전압을 보여준다. 화재 센서가 화재를 감지해 Vsensor가 LOW에서 HIGH가 되면, 마이크로컨트롤러는 Vswitch를 HIGH로 변경해 스위치를 ON 시켜 오디오 증폭기의 전원을 공급한다. 동시에 PWM 신호를 오디오 증폭기의 입력신호(Vamp)로 공급해 증폭된 출력 PWM 신호가 음파 소화기를 구동하게 된다. 안전 스토브 시스템의 전기적 신호들을 통해 시스템이 정상적으로 동작하는 것을 확인 할 수 있었다.

인클로저의 영향을 확인하기 위하여 인클로저의 유무에 따른 음압을 측정하였다. Figure 9는 콜리메이터의 원형 홀을 기준으로 거리(X)에 따라 측정된 음압을 보여준다. 음압은 데시벨미터(decibel meter; TECMAN TM810M)를 이용해 측정하였다. 인클로저가 없는 열린공간의 경우 양은용기가 위치한 0.5 m 거리에서 약 15 dB의 감소가 발생하였다. 이상적인 무한 3차원 공간에서 음파가 확산될 때 거리의 제곱에 반비례하는 역제곱법칙(inverse square law)을 따르기 때문에 거리가 0.1 m에서 0.5 m로 5배로 증가할 경우 이론

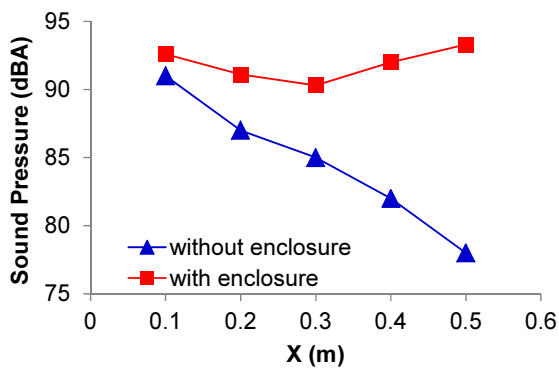


Figure 9. Measured sound pressure versus distance with and without the enclosure.

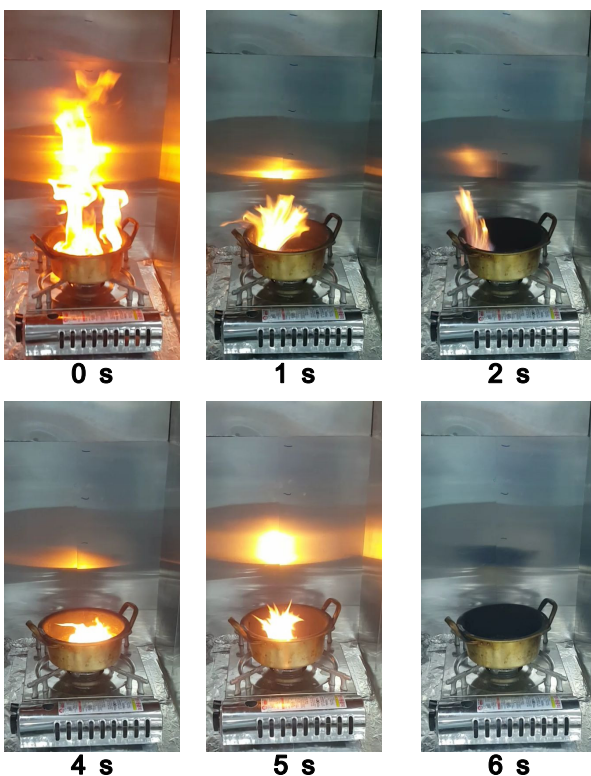


Figure 10. Suppression of the flame as time passes for 7-cc paint thinner.

적으로 14 dB의 감소가 발생하며, 이는 측정치와 근사한 값이다⁽¹⁵⁾. 인클로저가 있는 경우 음압은 거리의 영향을 크게 받지 않으며 90 dBA 이상으로 유지 되었다. 이것은 2.2 절의 시뮬레이션 결과(Figure 6)와 잘 부합한다. 인클로저를 이용하면 음파의 확산을 줄여 음파에너지의 전달과정에서 감쇠를 줄일 수 있는 것을 실험을 통해 확인할 수 있었다.

구현된 안전 스토브의 동작을 확인하기 위해 양은용기에 7 cc의 가연성 액체(paint thinner)을 넣고 점화 후 시간에 따른 화염의 변화를 관찰하였다. 실험의 용이성을 고려해 실제 음식물 대신 가연성 액체를 이용하였다. 3회에 걸친 반복 실험을 실시하였으며, 소화시간은 각각 3 s, 6 s, 8 s로

측정되었다. Figure 10은 소화시간이 6 s인 경우 시간에 따른 화염의 소화 과정을 보여준다. 음파에 의해 화염이 양은 용기 안으로 한정되는 현상을 명확히 관찰할 수 있다. 양은 용기에서 측정된 음압은 93 dBA이며, 음파소화기와 양은 용기 사이의 거리(X)는 0.5 m 이다. 가연성 액체의 양을 2 배(14 cc)로 증가시켜 3회의 반복실험을 실시하였고, 소화 시간은 8 s, 12 s, 15 s로 측정되었다. 음파 소화기를 사용하지 않고 자연소화에 소요되는 시간은 7 cc의 경우 평균 32.7 s (3회 반복 실험: 32 s, 33 s, 33 s)로, 14 cc의 경우 평균 36.0 s (3회 반복 실험: 34 s, 36 s, 38 s)로 측정 되었다. 최대값을 기준으로 각각의 음파소화 시간은 자연소화 시간의 24%와 42%에 해당한다.

3. 결 론

본 논문에서는 최초로 음파 소화기를 이용한 자동화재 진압 기능을 가진 안전 스토브 시스템을 제안하고 개발하였다. 결론은 다음과 같이 요약될 수 있다. (1) 음파 소화기, 화재 센서, 마이크로컨트롤러를 연동하여 별도의 신호원이 없는 새로운 안전 스토브 시스템 아키텍처를 개발하였다. (2) 인클로저를 이용해 구현된 시스템의 음파 소화기에서 전달되는 음압의 감쇠를 줄일 수 있다. (3) 구현된 시스템은 14 cc 이하의 가연성 액체에서 발생한 화염을 감지하고 효과적으로 진화할 수 있다.

향후 제안된 안전 스토브의 제품화를 위해서 연소 음식물의 종류 및 양에 따른 정량적이고 체계적인 실험을 통한 신뢰성 높은 데이터의 확보와 분석이 진행 되어야 한다. 또한 실험 데이터를 바탕으로 체계적인 시스템 설계와 최적화(음파 주파수, 스피커 용량, 재료의 내화성 등)가 요구된다. 해당 시스템은 향후 다양한 전열 가전제품에 적용되어 원활한 초기 화재 진압 및 화재 확산 방지에 기여할 것으로 기대된다.

후 기

본 연구는 서울과학기술대학교 교내연구비 지원으로 수행되었습니다.

References

1. StoveTop FireStop, <https://stovetopfirestop.com>.
2. M. Kim, "Fire Extinguishing Agent Chemistry", Donghwa Technology (2013).
3. https://en.wikipedia.org/wiki/John_Tyndall.
4. J. O'Connor, V. Acharya and T. Lieuwen, "Transverse combustion Instabilities: Acoustic, Fluid Mechanic, and Flame Processes", Progress in Energy and Combustion Science, Vol. 49, pp. 1-39 (2015).

5. W. Pun, S. L. Palm and F. E. C. Culick, "Combustion Dynamics of an Acoustically Forced Flame", *Combustion Science and Technology*, Vol. 175, No. 3, pp. 499-521 (2003).
6. F. Baillot and D. Demare, "Physical Mechanisms of a Lifted Nonpremixed Flame Stabilized in an Acoustic Field", *Combustion Science and Technology*, Vol. 174, No. 8, pp. 73-98 (2002).
7. T. Yano, K. Takahashi, T. Kuwahara and M. Tanabe, "Influence of Acoustic Perturbations and Acoustically Induced Thermal Convection on Premixed Flame Propagation", *Microgravity Science and Technology*, Vol. 22, pp. 155-161 (2010).
8. <https://phys.org/news/2012-01-darpa-suppression-method.html>.
9. Y. Shi, Q. Zhang, X. Chen, H. Shi, X. Gan and B. Yuan, "Experimental Research of Acoustic-based Flame Suppression for Space Application", 24th International Congress on Sound and Vibration (2017).
10. E. Beisner, N. D. Wiggins, K. Yue, M. Rosales, J. Penny, J. Lockridge, R. Page, A. Smith, et al., "Acoustic Flame Suppression Mechanics in a Microgravity Environment", *Microgravity Science and Technology*, Vol. 27, pp. 141-144 (2015).
11. S. Robertson and V. Tran, "Wave Extinguisher", ECE-492/3 Senior Design Project, George Mason University (2015).
12. D. Plaks, E. Nelson, N. Hyatt and J. Espinosa, "Zero-G Acoustic Fire Suppression System", *Journal of the Acoustical Society of America*, Vol. 118 (2005).
13. https://en.wikipedia.org/wiki/Vortex_ring.
14. D. R. Campbell, K. J. Palomaki and G. J. Brown, "A MATLAB Simulation of 'Shoobox' Room Acoustics for use in Research and Teaching", *Computing and Information Systems Journal*, Vol. 9 (2005).
15. <http://hyperphysics.phy-astr.gsu.edu/hbase/Acoustic/invsqs.html>.