

밀폐공간에서 액체연료 화염의 거동에 관한 실험적 연구

전길송* · 황지현* · 이태원**†

An Experimental Study on the Behavior of Liquid Fuel Flames in the Confined Space

Kil Song Jeon* · Ji Hyun Hwang* · Tea Won Lee**†

†Corresponding Author

Tea Won Lee

Tel : +82-31-910-0587

E-mail : twlee@kict.re.kr

Received : January 4, 2021

Revised : February 8, 2021

Accepted : March 10, 2021

Abstract : Modern society shows rapid growth that is different from that of the development of existing technologies. The development of these technologies has led to the tendency of buildings to become dense, large and advancing. Regarding fire hazards, the possibility of large-scale fires causing fatal damage, due to the rapid spread of fire, increases. Therefore, for this reason, fire defense, i.e. detection and fire extinguishing facilities, in buildings are essential and well applied. But there are always limitations to that. Based on this reason, we would like to suggest the introduction of a new concept of a fire safety system. The method presented here is not only to use a single system for fire detection and fire extinguishing systems but to jointly use it in the environment and energy management fields within the building. However, an important step is required before introducing a system of these technologies. The fire extinguishing method proposed by this system is a method of extinguishing by blocking oxygen flowing into the space where the fire occurred. However, a sufficient basis is needed for this system to be applied in practice. Therefore, in this study, we intend to conduct a preliminary experiment to introduce the new concept of fire detection and extinguishing. The experiment used ethanol with a relatively simple combustion reaction and a high possibility of complete combustion. As a result, it was confirmed how the internal values changed during a fire using ethanol. Resultingly, we obtained the internal oxygen concentration and internal environmental changes according to the initial flame size. Lastly, the data accumulated in this study can be used as data for application in an automatic fire extinguishing system.

Key Words : fire safety, liquid fuel, flame size, fire detection and extinguishing

Copyright©2021 by The Korean Society of Safety All right reserved.

1. 서론

현대 사회는 기존의 기술의 발전 속도와는 또 다른 매우 급속한 성장을 보여주고 있고, 이와 같은 기술의 발전은 건축물들의 대형화, 고도화 및 밀집화 경향과도 무관하지 않다. 현대의 건축물을 화재안전 측면에서 살펴보면 대형화되고 복잡한 구조로 인해 화재 확산 속도가 빠르고 치명적인 피해를 일으키는 대형 화재가 발생할 가능성이 매우 높다^{1,2)}. 따라서 건축물 내에 화재 감지 및 소화 설비에 대한 방비는 필수적이며

법률로도 명시하고 있다. 하지만 이런 실정에도 불구하고 현재 적용되는 기술 및 운영의 한계에 따라 많은 문제점들을 지니고 있는 게 사실이다.

한편, 현대의 건물에는 에너지와 환경의 관리에 정보통신 분야 첨단 기술을 이용한 실시간 상태감시 및 제어기술을 활용하고 있는 반면, 소방 관련 설비는 이에 비하면 매우 낙후되어 있다. 이에 건물에서 사용되는 에너지 및 환경 관리용 실시간 관제시스템에 화재 안전 기능을 추가해 통합 운영함으로써 비용을 절감하고 성능을 향상시키고자 하는 시도가 증가해 왔다. 여

*한국건설기술연구원 화재안전연구소 연구원 (Fire Research Institute, Korea Institute of Civil Engineering and Building Technology)

**한국건설기술연구원 화재안전연구소 선임연구위원 (Fire Research Institute, Korea Institute of Civil Engineering and Building Technology)

기에는 화재의 발생 여부를 감시하는 기술과, 화재발생시 이를 조기에 감지해 판단하고 적절한 소화기술을 적용하는 것이 포함된다.

이론적으로 화재의 발생요소로 불에 타는 재료인 화원과 열원, 그리고 산소가 필요하다. 연소 시에 요구되는 산소의 양은 정해져 있으며, 이 최소한의 산소의 양이 존재하지 않을 경우 화재는 자연 진화된다. 대기 중에 존재하는 산소는 약 21%로 알려져 있으며 일반적으로 산소농도가 10~15% 사이에서 대부분의 연소물이 자연 진화된다. 이러한 이론을 바탕으로 모니터링 기반 소화기술은 일정 공간으로 유입되는 산소를 차단함으로써 화재의 주 원인인 연료가 산화되는 것을 조기에 방지하는 방법이 이용될 수 있다¹⁻³⁾. 하지만 현재 여기에 활용할 밀폐공간에서 산소농도에 따른 화염의 거동 등 소화 기재 관련 기초자료가 부족한 실정이다.

따라서 본 연구에서는 밀폐공간에서의 산소농도에 따른 화염의 거동에 관한 데이터 축적을 위한 실험을 수행하였다. 먼저 일정 공간을 밀폐시켜 산소를 차단하고 연기와 이산화탄소 농도, 온도 및 산소 농도를 측정하여 시간에 따른 화염의 거동특성을 확인하였다. 이에 대한 내용은 3절에서 설명하도록 하겠다⁴⁻⁵⁾. 추가로 초기 화염의 크기에 따라 위 측정 수치들이 어떠한 경향을 보이는지 확인하기 위한 실험 역시 수행하였다. 본 실험에서는 화원으로서 에탄올을 사용하였는데, 에탄올은 비교적 연소반응식이 간단하며 완전연소 가능성이 크다는 점을 고려하였다⁶⁾.

이와 같은 결과를 이용하면, 실시간으로 측정되는 연기, 이산화탄소, 산소 농도 및 공간 온도 등의 정보를 이용하여 화염 발생 여부 확인이 가능하며 산소농도 조절을 통한 소화 역시 가능할 것으로 예상된다. 다만 본 연구에서 적용한 조건들은 제한된 범위의 조건만을 적용한 경우에 해당하므로 이와 같은 결과를 현장에 적용하기 위해서는 더 다양한 상황과 조건에 대한 추가적인 연구가 필요한 것으로 판단된다⁷⁻⁹⁾.

2. 실험장치 및 방법

2.1 실험장치

본 연구에서는 밀폐공간에서의 화염의 거동에 대한 실험을 위해 실제 공간의 상황을 대체할 수 있는 시뮬레이터를 제작하여 실험하였다. Fig. 1에 보인 시뮬레이터의 크기는 1.2 m×0.435 m×0.6 m이며(일반 사무실 공간에서 공조를 위한 단위 공간의 1/6 축소 적용), 흡기 및 배기 장치가 설치되어 있으며 외부에서 조작이 가능하도록 하였다.



Fig. 1. A simulator used for experimentation.

또 상단에는 화재감지를 위한 복합 센서를 설치하였으며, 이는 하나의 장치를 이용해 화재감지는 물론 에너지와 환경에 대한 정보를 공유하지는 취지를 반영한 결과다. 복합 센서로는 온도, 습도, 산소, 이산화탄소는 물론, 연기와 먼지 농도 등이 측정되며 이 수치들은 통신을 통해 실시간으로 측정되며 확인할 수 있도록 하였다. 여기서 연기와 먼지 농도에 대해 자세히 살펴보면 먼저 연기는 가연물의 연소 과정에서 발생하는 생성물과 미반응 기체, 액체, 고체 미립자들의 혼합물을 의미하며 이산화탄소, 일산화탄소, 알데히드, 탄소입자 등을 포함하고 있다. 이와 유사하지만 먼지는 대기 중 고체 입자 및 액체 입자로 이루어져 있으며 탄소, 유기탄화수소, 기타 부유물 등의 물질을 의미하며 10 μm 미만의 입자를 가지고 있는 것으로 정의한다. 화염이 발생하기 전에는 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 단위로 10 μm 미만의 연기입자의 양을 측정하다가 화염이 발생하게 되면 그에 따라 생성되는 연기를 ppm 단위로 측정되게 된다.

실험에 사용된 복합 센서의 제원을 Fig. 2에 보였다. 이렇게 설계된 실험 장치를 통해 다양한 상황과 조건을 통제하며 구현할 수 있으며 수집된 각종 정보를 활

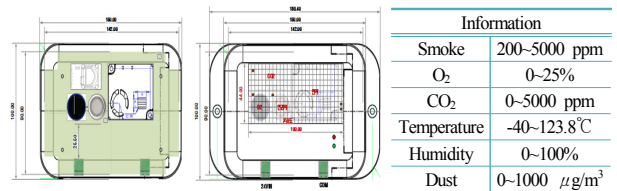


Fig. 2. A multipurpose sensor used for experimentation.

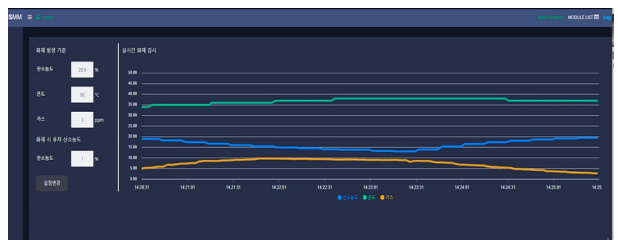


Fig. 3. A screen with data being measured in real time.

용해 분석을 수행하였다. 실시간으로 측정되는 수치들에 대한 화면을 Fig. 3에 나타내었다.

2.2 실험방법

본 실험은 밀폐공간에서 화염 발생부터 소화상태까지 이를 확인하고, 그 때의 각종 수치들의 변화량을 측정하여 화염의 거동에 관한 경향을 예측하는 것이다. 따라서 앞에서 설명한 시뮬레이터를 이용하면 여러 화염 발생 상황에 대한 실험이 가능하다. 하지만 아직 기본적인 데이터 축적이 충분하지 않기 때문에 변수를 최소한으로 하여 실험을 진행하였다. 그리고 연소반응식이 간단하며 완전연소 가능성이 큰 액체연료 중 에탄올을 이용하여 실험을 수행하였다.

본 실험에서는 주요 파라미터로 화원의 크기를 선정했다. 일반적으로 화원의 크기는 산소의 농도 등 주변의 환경과 상황에 따라 변하므로 화원 크기의 대표값으로 초기 화원의 크기를 측정해 사용하였다. 즉, 초기 화원의 크기를 개방된 공간에서 단위 시간당 연소되는 에탄올 사용량을 측정하여 정의하였고 그 때의 단위를 [g/min]로 나타내었다. 즉, 본 연구에서는 화원의 크기를 가연물의 질량감소속도로 표현하였으며 이를 화원의 규모로 정의하였다. 따라서 단위 시간당 에탄올 감소량이 클수록 초기 화염의 크기가 크다고 할 수 있다. 각종 초기 화원의 크기에 따른 연기, 이산화탄소 및 산소 농도와 공간의 온도 등을 측정하였다.

실험시에는 시뮬레이터 내부에 에탄올 램프를 이용하여 불을 붙이고 흡기 및 배기 장치를 조작하여 내부 공간에 유입되는 산소를 차단시켜서 소화상태가 가능한지 확인하여 그 때의 수치(연기, 이산화탄소, 산소 농도 및 온도)들을 확인한다. 시뮬레이터 자체가 가지고 있는 한계(구조 및 재질)가 존재하여 완벽한 밀폐상태를 유지하는 것이 쉽지는 않으나, 최대한 밀폐상태를 구현하고자 하였다¹⁰⁾.

3. 실험결과 및 고찰

3.1 화염 거동 분석

먼저 에탄올 램프를 이용하여 밀폐를 통한 소화 실험 진행하였고 시간이 지난 뒤 저절로 불이 꺼지는 것을 확인하였다. 이때 사용된 에탄올의 초기 화원의 크기는 약 2[g/min]에 해당되며 소화까지 걸리는 시간은 25분이었다. 화염 발생부터 불이 꺼질 때의 연기, 이산화탄소 및 산소의 농도와 온도의 시간변화를 그래프로 정리하여 확인하였다.

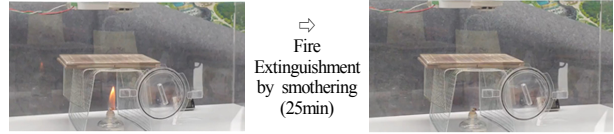


Fig. 4. The process of extinguishing the fire by suffocation.

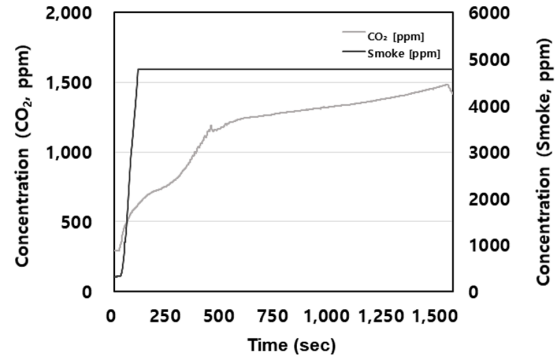


Fig. 5. Time variation of smoke concentration and carbon dioxide concentration.

Fig. 5는 초기 화원의 크기가 약 2[g/min]일 때 연기 발생량 및 이산화탄소 농도의 시간변화를 도시한 것이다. 먼저 연기 발생량은 점화가 시작된 이후로 소화될 때까지 계속 증가하는 경향을 보여주었다. 점화 후 초기에는 연기 발생량이 많아서 기온이 급격하며 점점 완만해지는 결과를 보여주고 있다. 이는 화염 발생 초기에는 비교적 충분한 산소가 공급되어 연소가 원활하게 이루어지며 이에 따른 연기 발생량도 급격하게 증가하는 경향을 나타내다가, 일정 시점 이후에 밀폐공간이라는 특성으로 산소 공급이 차단되고 공간 내부에 존재하는 산소의 양 역시 줄어들면서 산화반응 속도가 떨어지고 동시에 연기 발생량도 감소하는 것으로 판단된다.

한편, 이산화탄소 농도는 착화하자마자 급격히 증가하는 경향을 보여주고 있다. 즉 연기농도에 비해 이산화탄소 농도가 더 급격한 변화를 보이는데 이는 에탄올 화학 반응식 자체에서도 에탄올 대 이산화탄소가 1:2 비율로 매우 많이 생성되며, 또한 사용된 센서의 민감도가 매우 높은 편이므로 센서의 측정 범위 내에서 이산화탄소가 발생하게 되면 급격하게 증가하는 결과를 보여주었다. 에탄올 연료의 연소특성에 따라 연기 발생 비율이 높지 않아 연기농도 증가량은 상대적으로 낮음을 볼 수 있다. 한편, 일정 시간 이후에는 이산화탄소 농도가 변화를 보이지 않는데, 이는 센서의 측정 범위의 한계 때문이며 최대 측정값인 4950 ppm 이상에서는 더 측정되지 않았다. 본 연구에서 화염 발생에 따른 이산화탄소 발생 확인에 의미를 두었으며, 화염에 상태에 따라 더 명확하게 측정해야 되는 수치

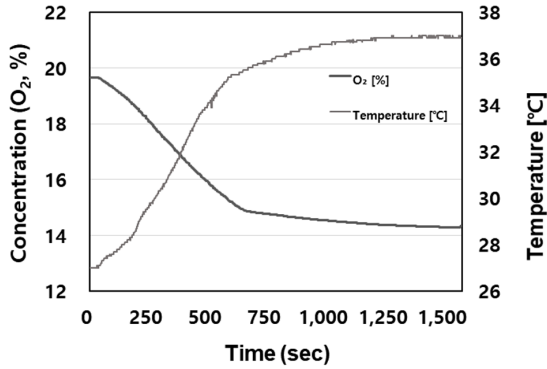


Fig. 6. Time variations of temperature and oxygen concentration.

는 산소농도이기 때문에(산소농도를 통한 소화조절), 최대치 측정을 위한 센서로 교체하지 않았다.

Fig. 6은 위와 같은 조건에서 시간에 따른 산소 농도 및 온도의 변화를 도시한 것이다. 먼저 산소농도의 변화를 보면, 밀폐공간이라는 특성 및 한계로 인해 화염 발생부터 소화 시점까지 지속적으로 감소하는 경향을 보이는데, 특히 점화 후 약 600초까지는 산소농도가 선형적으로 감소하다 이후로는 감소율이 급격하게 떨어지는 것을 볼 수 있다. 이는 연소가 진행되면서 실험 공간 내부에 존재하는 산소량이 감소하고 결국 주위로부터 공급되는 산소의 결핍으로 산화반응 속도가 감소한 결과로 판단된다¹¹⁾. 또한 화염의 크기는 주위의 온도증감에도 영향을 미치므로 온도와 산소농도의 곡선은 거의 대칭을 이루며 변화하는 경향을 보여주고 있다. 그래프에서 온도와 산소 농도의 변화량에 대한 패턴을 보면, 화염이 없는 일반적인 상태에서는 온도와 산소농도가 일정하게 유지되고 있다가 화염이 발생하면 산소농도는 감소하기 시작하며 온도는 증가하기 시작한다. 이 시점을 화염 발생 시점으로 판단할 수 있다. 이와는 반대로 화염이 지속되는 동안에는 산소농도가 계속 감소하고 온도는 증가하게 될 것이다. 그 후에 화염이 소화된다면 산소농도는 최저값을 유지할 것이고 온도는 최고값을 유지하다가 서서히 떨어지게 될 것이다. 이 변화량을 나타내는 시점을 소화 시점으로 판단할 수 있을 것이다.

3.2 화원의 크기에 따른 변화

화원의 크기에 따른 액체연료의 연소 거동을 파악하기 위해 개방된 공간에서 조절된 초기 화원의 크기를 변화시키면서 밀폐공간에서 화염 발생 후 소화되는 시점에서의 각종 상태량을 측정하였다. 산소 소모량은 화학 반응식을 활용하였으며, 에탄올 대비 1:3 몰비로 반응하므로 이를 통하여 계산하였다. 또한 계산식으로

Table 1. Experimental results

Fire scale [g/min]	Ethanol consumption [g]	Oxygen consumption [g]	Limiting oxygen concentration measured data [%]	Limiting oxygen concentration calculation data [%]	Fire extinguishing time [min]
0.48	10.51	21.88	14.90	16.11	45
1.19	12.92	26.88	14.30	14.99	38
1.61	15.73	32.72	13.50	13.69	28
2.11	17.14	35.63	13.35	13.04	22
2.46	22.61	47.04	9.97	10.49	12

사용된 산소 소모량을 이용하여 반대로 밀폐공간에서 남아있는 산소의 양을 계산하고 이를 통하여 이론적인 한계 산소농도 값을 계산하였다¹²⁻¹⁴⁾. 여기서 한계 산소농도란 소화 시점에서의 산소 농도로 정의하였다. 마지막으로 소화에 걸리는 시간을 측정하였고, 이를 Table 1에 정리하였다.

계산을 통한 한계 산소농도 값과 측정된 한계 산소농도 값의 차이가 존재하는데 전반적으로 계산을 통한 한계 산소농도 값이 더 큰 것을 알 수 있다. 이러한 결과는 계산을 통한 한계 산소농도 값에는 연소 시 발생하는 연소 생성물에 대한 고려가 생략되었으나 실제 측정값에는 이 생성물에 대한 영향이 있기 때문으로 추측된다. 또한 이론식을 통한 계산은 표준상태를 가정하였지만 실제로 실험은 화염 발생에 따른 내부 온도 상승 상태에서 연소가 진행된다. 따라서 이러한 온도 변수 적용 유무에 따라 값의 차이가 발생한다. 이렇듯 본 연구에서 사용된 이론식은 분명 한계가 존재한다. 실제 실험에 대한 조건이 대부분 반영되지 않았으며 단순한 화학 반응식을 이용하여 대략적인 경향에 대한 예측을 위해 사용되었다. 결과적으로 실제 실험과 전체적인 경향은 유사하나 세부적으로 차이가 존재한다. 따라서 차후 연구에는 이 부분을 보완할 수 있는 이론식에 대한 개선이 필요한 것으로 판단된다.

화원의 크기에 따른 실험 역시 3.1절과 마찬가지로 각각 연기, 이산화탄소, 산소의 농도 및 온도에 대하여 측정하였다. 그 측정값을 그래프로 정리하였다. 화원의 규모에 따라 화염발생부터 소화까지의 시간이 모두 다르므로 그래프 상에서 끝나는 시점이 모두 다르다.

Fig. 7은 점화개시 시점으로부터 소화 시점까지의 연기농도의 시간변화를 도시한 것이다. 3.1절에서 측정된 연기 발생 그래프와 화원의 규모가 비슷한 2.11 [g/min]에서는 유사한 발생 경향을 보여주나 다른 화원의 크기의 결과는 다소 다른 결과를 볼 수 있다. 화원의 크기가 2.46[g/min]인 경우는 일정 시간 이후에 다시 발생량이 증가하는 경향을 보여주는데, 이는 500초 이

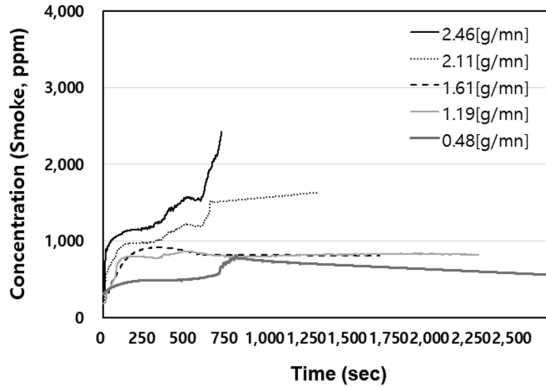


Fig. 7. Time variations of the concentration of smoke for various initial flame size.

후에 낮아진 산소농도 때문에, (약 10%) 불완전 연소가 이루어졌고 이에 따라 발생하는 연소 생성물에 의한 영향으로 판단된다.

2.11[g/min] 이하의 화원 크기에서는 화염 소화 시점까지 산소농도가 13% 이상을 모두 유지하고 있었으므로 이에 대한 영향이 적어서 발생량이 작은 것으로 생각된다. 물론 초기 화원의 크기가 클수록 연기 발생량은 큰 것을 볼 수 있다. 하지만 1.61[g/min] 이하에서는 거의 유사한 발생량을 보이고 있다. 화원이 가장 작은 0.48[g/min]의 경우에도 초기 발생량은 다른 화원의 크기에 비해 작지만 시간이 흐름에 따라 증가하는 경향을 나타내었다. 하지만 일정 시간이 지난 후 1.61[g/min] 이하의 화원 크기에서 연기의 농도가 다시 감소하는 경향을 보여주고 있는데, 이는 연기의 확산에 따른 센서 위치에 따른 측정결과의 차이로 판단되며, 화원의 크기가 작은 경우에는 감시를 위한 측정 센서의 위치도 영향을 미칠 수 있을 것으로 판단된다.

Fig. 8은 이산화탄소 농도의 시간 변화 그래프를 도시한 것으로, 3.1절에서 측정된 이산화탄소 농도 변화량 측정 그래프와 거의 유사한 경향을 보여주었다. 화원의 크기에 따라서 초기에 발생하는 이산화탄소 발생량에 대한 속도 차이는 존재할 것으로 예측되었으며, 측정결과 아주 미세한 차이를 나타내었다. 이는 이산화탄소 측정 센서가 매우 미세한 양부터 측정이 가능하기에 초기 발생하는 이산화탄소에 대해서 빠른 측정이 가능하기 때문이고, 최대값 측정 한계치가 비교적 낮기 때문에 빠른 시간 동안 최대 측정 한계치를 넘어서기 때문에 뚜렷한 차이를 나타내지 못했다. 따라서 그래프를 상에서 동일하게 보이는 값 모두 최대값 발생량은 다를 것으로 예상된다. 이산화탄소 발생 최대값 측정을 통해서 더 정확한 패턴 분석이 가능할 것으로 예상되나, 센서의 한계로 더 이상의 측정은 불가능하였다.

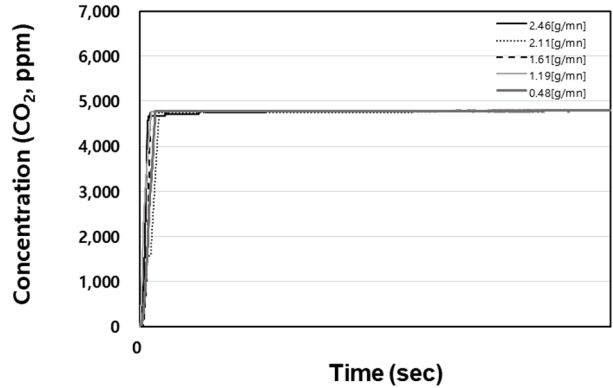


Fig. 8. Time variations of the carbon dioxide concentration for various initial flame size.

Fig. 9는 점화개시로부터 소화 시점까지 온도의 시간변화를 도시화한 것이다. 온도 변화에 따른 기본 패턴은 화염이 발생하며 온도가 증가하다가 소화가 된 후 유지한 뒤 서서히 감소한다. 하지만 화원의 규모에 따른 차이점이 존재한다. 화원의 규모가 비교적 작은 경우에는 일정한 패턴의 온도 곡선을 나타낸다. 시간에 따라 산소가 소모됨에 따라 동시에 화원 규모가 축소되고, 이 축소 폭이 화원이 작은 경우 더 차이가 작기 때문에 이러한 경향을 나타내는 것으로 예상된다. 하지만 화원이 큰 경우에는 온도 변화량이 짧은 시간 동안 매우 크게 나타나기 때문에 다른 형태를 보여주는 것으로 판단된다. 특히 2.11[g/min]의 경우에는 시간에 따라 화원의 크기가 줄어들면서 온도 변화에 영향을 주었을 것으로 생각된다. 2.46[g/min]의 경우에는 화원의 크기가 변화하기 전에 단시간 내에 소화가 이루어져서 이런 패턴을 보인 것으로 생각된다. 따라서 온도 변화 하나의 패턴을 이용하여 화염의 소화 시점을 판단하기에는 변수들이 존재하므로 3.1절에서 제시했듯이 온도-산소농도 등의 복합적인 데이터 해석을 통한 상황 판단이 필요하다.

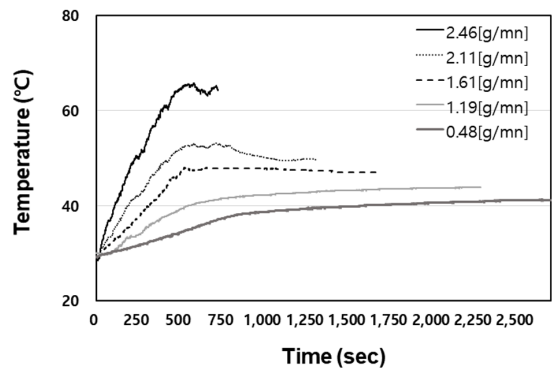


Fig. 9. Time variations of temperature for various initial flame size.

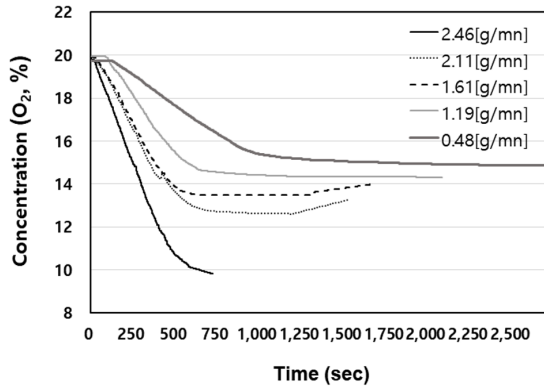


Fig. 10. Time variations of the oxygen concentration for various initial flame size at the time when flame extinguished.

Fig. 10은 점화개시로부터 소화 시점까지 산소농도의 시간변화를 도시한 것이다. 기본적으로 점화 후 지속적으로 감소하다가 소화 시점에서 최소값을 나타내는 경향을 보여준다. 또한 화원의 크기에 따라 소화되는 시점의 산소농도가 다를 수 있는데, 화원의 크기가 클수록 소화 시점에서의 산소농도가 더 낮아지는 경향을 보여주고 있다. 이는 소화되는 시점의 산소농도가 환경에 따라 고유의 값을 가지는 것을 의미한다. 따라서 이때의 산소농도를 한계 산소농도로 정의하여 사용하였다. 이러한 현상은 화원의 규모가 큰 경우 급격하게 산소를 더 많이 소모하면서 생긴 현상으로 예상되며 이 한계 산소농도를 통한 화염의 제어가 가능할 것으로 판단된다. 다음으로 전체적으로 일정한 산소 소모 패턴을 보여준다. 초기 점화 개시 후 일정한 산소 소모량을 보이다가 시간이 지난 뒤에 산소 소모율이 감소하는 것을 보여주었다. 이는 앞에서도 언급했듯이 시간이 흐름에 따라 공간 내에 존재하는 산소가 소모되고 그에 따른 화염의 크기도 같이 줄어들기 때문이다.

3.3 소화특성

Fig. 11은 초기 화염의 크기에 따른 소화한계 · 산소농도를 도시한 것으로, 여기서 소화한계란 주어진 환경조건에서 화염이 스스로 소화되는 산소농도로 정의하였다. 3.2절에서 화염 크기에 따른 산소농도의 변화량에 대해서 살펴보았는데 그 중에서도 특히 소화 시점에서의 산소농도인 소화한계 산소농도에 대해 따로 정리한 결과다.

초기 화원의 크기가 증가할수록 소화한계 산소농도는 기하급수적으로 감소하는 경향을 볼 수 있는데, 이는 화원의 크기가 클수록 산소의 소비량이 급격히 감소하기 때문인 것으로 판단된다. 즉, 일정공간에서 일정 규모 이상의 화원에 의한 화염이 발생하면 내부에

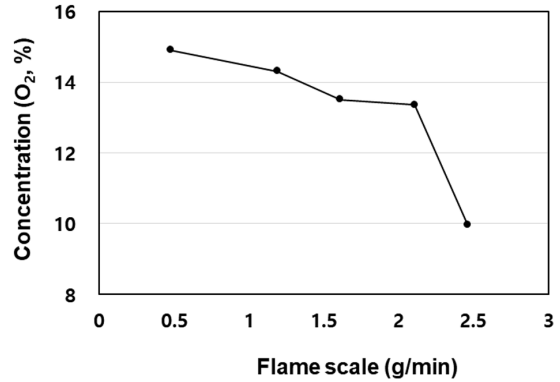


Fig. 11. Variations of the oxygen concentration at that time according to the initial flame size.

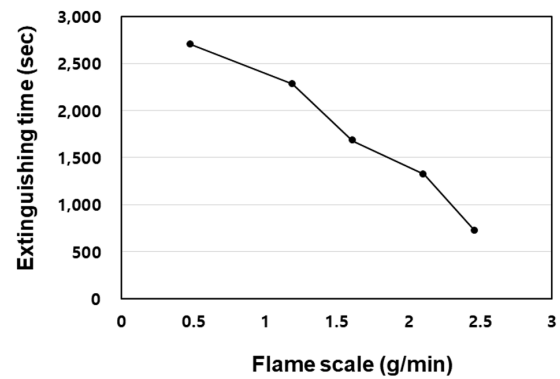


Fig. 12. Variations of the extinguishing time at that time according to the initial flame size.

존재하는 산소를 급격하게 소모하면서 한계 산소농도가 크게 낮아지는 결과를 보여주었는데, 이는 동일한 화원이라 할지라도 화염 발생 상황 즉 화원의 크기에 따라 한계 · 산소농도는 달라질 수 있음을 의미한다. 물론 화원의 종류가 다르다면 결과는 말할 나위도 없을 것이며, 결국 산소 농도 제어를 통한 소화에 이용하기 위해서는 보다 다양한 조건과 변수에 대한 한계 산소농도에 대한 데이터를 필요로 한다.

화원의 크기에 따른 소화시간 특성도 확인하였다. Fig. 12는 초기 화염 크기에 따른 소화 시간을 비교한 것으로, 전반적으로 초기 화원의 크기가 클수록 소화 시간은 짧아지는 것으로 나타났으며, 산소농도의 경우와는 달리 본 연구에서 고려한 화원 크기의 범위 내에서는 전반적으로 선형적으로 감소하는 것으로 나타났다.

4. 결론

밀폐된 공간에서 에탄올을 사용한 액체연료 화염의 크기에 따른 거동특성 규명을 위한 실험을 통해 다음과 같은 결과를 얻었다.

(1) 개방된 공간에서 액체연료의 질량감소 속도를 초기 화원의 크기 [g/min]로 정의하였으며, 밀폐된 공간에서 화원의 크기에 따른 연기, 이산화탄소 및 산소의 농도와 공간 온도의 시간변화 특성을 규명하였다.

(2) 밀폐된 공간에서 화염이 스스로 소화되는 산소농도인 소화한계 산소농도를 정의하였으며, 이는 화원의 종류와 크기에 따라 고유의 특성을 가진다.

(3) 본 연구에서 대상으로 한 액체연료의 경우, 초기 화원의 크기가 증가할수록 소화한계 산소농도는 기하급수적으로 감소하며 소화시간은 거의 선형적으로 감소하는 경향을 보여주었다.

이상의 결과를 토대로 다양한 화원의 종류 및 크기에 따른 충분한 실험자료 수집이 필요하며, 실제 상황을 더 정확하게 예측할 수 있는 이론식에 대한 개선이 필요하다. 이를 활용하여 다양한 상황과 조건에서의 화염 거동에 대한 데이터베이스가 구축된다면 유사시 화염의 제어 및 소화에 매우 유용하게 활용될 수 있을 것으로 판단된다.

Acknowledgement: This research was supported by a grant from the Development of exterior wall building system for satisfying with fire safety and heat insulation property (20200024-001) the Urban architecture research business (20AUDP-B099686-06) funded by Korea Institute of Civil Engineering and Building Technology and the Ministry of Land, Infrastructure, and Transport of Korea.

References

- 1) Act on Fire Prevention and Installation, Maintenance, and Safety Control of Fire-fighting Systems, National Fire Agency, 2017.
- 2) I. J. Shin, "Comparative Study on the Institutional Framework of Risk Assessment between German, UK and Korea, Japan In Asian Countries", J. Korean Soc. Saf., Vol. 28, No. 1, p. 156, 2013.
- 3) M. H. Kim and S. W. Seo, "A Study on Improved Disaster Management System in Defense Field", J. Korean Soc. Saf., Vol. 32, No. 3, p. 111, 2017.
- 4) National Fire Code 2010, "Standard for Fixed Aerosol Fire-Extinguishing System", NFPA, 2010.
- 5) ISO 15779, "Condensed Aerosol Fire Extinguishing System", ISO, 2009.
- 6) R. C. Costa and J. R. Sodre, "Hydrous Ethanol Vs. Gasoline-ethanol Blend : Engine Performance and Emissins", Fuel, Vol. 89, pp. 287-293, 2010.
- 7) A. Frassoldati, A. Cuoci, T. Faravelli and E. Ranzi, "Kinetic Modeling of the Oxidation of Ethanol and Gasoline Surrogate Mixtures", Combustion Science and Technology, Vol. 182, pp. 653-667, 2010.
- 8) H. Richter, and J. B. Howard, "Formation of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons and Their Growth to Soot - A Review of Chemical Reaction Pathways," Prog. Energy Combust. Sci., Vol. 26, pp. 565-608, 2000.
- 9) J. H. Ji and E. J. Lee, "The Characteristics of Soot at the Post-Flame Region in Jet Diffusion Flames Added Carbon Dioxide", J. Korean Soc. Saf., Vol. 25, No. 6, pp. 9-13, 2010.
- 10) D. A. Crowl and J. F. Louvar, "Chemical Process Safety Fundamentals with Application", 2nd ed., Pearson Education Inc., 2002.
- 11) T. N. M. Borhani, A. Afzali and M. Bagheri, "QRPR Estimation of the Auto-igniton Temperature for Pure Hydrocarbons", Process Safety Environment Protection", Vol. 103, pp. 115-112, 2016.
- 12) D. M. Ha, "The Measurement and Prediction of Fire and Explosion Properties of n-Nonane", J. Korean Soc. Saf., Vol. 31, No. 4, pp. 42-48, 2016.
- 13) D. M. Ha, "A Study on the Reliability of the Combustible Properties for Acrylic Acid", J. of Energy Engineering, Vol. 24, No. 3, pp. 22-26, 2015.
- 14) NFPA, "Fire Hazard Properties of Flammable Liquid, Gases, and Volatile Solids", NFPA 325M, National Fire Protection Association, 1991.