[Technical Paper]

산소소모 열량 측정법 기반의 열발생률을 측정하기 위한 헬스케어용 산소센서의 적용

윤홍석 · 류상훈* · 황철홍**†

대전대학교 대학원 방재학부 대학원생, *(주)페스텍 대표이사, **대전대학교 소방방재학과 교수

Application of Oxygen Sensor for Healthcare to Measure Heat Release Rate Based on Oxygen Consumption Calorimetry

Hong-Seok Yun · Sang-Hoon Ryu* · Cheol-Hong Hwang**†

Graduate Student, Department of Disaster Prevention, Graduate School, Daejeon University,

*CEO, FESTE International Co., Ltd.,

**Professor, Department of Fire and Disaster Prevention, Daejeon University

(Received March 24, 2021; Revised March 24, 2021; Accepted April 7, 2021)

요 약

열발생률 측정을 위한 산소소모열량계 시스템에서 샘플링 가스의 화학종 분석을 위한 CO/CO₂ 및 O₂ 분석기는 시스템의 구축비용을 증가시키는 주 요인이다. 본 연구에서는 기존의 고가형 장치와 유사한 성능을 가지는 보급형 장치를 개발하기 위한 실험적 연구가 수행되었다. 열발생률 측정에 대한 CO/CO₂ 분석기의 기여도를 평가하기 위해 다양한 화재성장률의 확산화염을 대상으로 CO/CO₂의 측정여부에 따라 비정상 및 정상상태에 대한 측정성능이 검토되었다. 그 결과 O₂ 농도만을 고려하더라도 열발생률의 적절한 측정이 가능함을 확인하였다. 이를 바탕으로 헬스케어용 산소센서를 이용해 제작된 보급형 O₂ 분석기의 측정성능이 검증되었다. 다양한 화재성장률을 갖는 확산화염에 대한 보급형 O₂ 분석기의 검증 결과, 비정상 및 정상상태 화원에 대해 10% 이내의 상대오차를 가지며, 열발생률 측정에 활용이 가능함을 확인하였다.

ABSTRACT

In an oxygen consumption calorimeter system for measuring heat release rate, the CO/CO₂ analyzer and the O₂ analyzer for chemical species analysis of the sampling gas are the main factors that increase the construction cost of the system. In this experimental study, a low-cost device with performance similar to that of the existing high-cost device was developed. To evaluate the contribution of the CO/CO₂ analyzer to the measurement of the heat release rate, the performance of unsteady and steady-state conditions depending on whether CO/CO₂ was measured for diffusion flames with various fire growth rates was examined. As a result, it was confirmed that when only the O₂ concentration was considered, the heat release rate could be measured accurately. Based on these results, the measurement performance of a low-cost O₂ analyzer manufactured using an oxygen sensor for healthcare was verified. As a result of the verification of the low-cost O₂ analyzer for diffusion flames with various fire growth rates, it was confirmed that the relative error was within 10% for unsteady and steady-state fire sources and can be used to measure the heat release rate.

Keywords : Oxygen consumption calorimeter, Heat release rate, O₂ sensor for healthcare

1. 서 론

산업 및 건축기술 발달에 따른 건축물의 고층화는 한정된 면적 내 거주하는 인구 및 재산의 밀집을 야기하였다.

이로 인해 최근 5년간 (2015~2019) 화재로 인한 인명피해는 약 20%, 재산피해는 100% 증가하였다⁽¹⁾. 이에 화재공학 분야에서 높은 화재위험성을 갖는 공간을 대상으로 가연물의 종류 및 양, 환기조건 등 변수에 따른 화재특성을 이해

하기 위한 연구들이 이루어지고 있다⁽²⁻⁴⁾. 화재특성은 연구자의 관심에 따라 화재환경 내 다양한 물리량에 의해 정량화 될 수 있다. 대표적으로 온도, 열유속, 연기농도 등 허용피난시간(Available safety egress time, ASET)의 관련 물리량, 그리고 열발생률을 들 수 있다. 이들 물리량은 검증된 측정기법에 기반한 장치들을 통해 측정되고 있다. 이 장치들은 화재실험에의 적용을 통해 화재특성의 이해 및 안전 확보에 기여하고 있으나 단위가격이 높으며, 화재조건에 따라 오차를 가질 수 있어 사용상 주의가 요구된다. 이러한 단점은 다양한 화재조건에 대한 실험과 화재환경 내 다양한 위치에서의 측정에 어려움으로 작용한다. 이를 극복하기 위해 최근 기존의 장치와 동일한 측정기법에 기반하여 유사한 측정성능을 가지면서도 경제성, 활용성을 향상할 수 있는 보급형 측정장치들이 개발되었다. 이들 연구에서는 ASET 관련 물리량인 온도, 열유속, 연기농도의 측정을 위한 보급형 장치가 개발되었다⁽⁵⁻⁷⁾. 그러나 가연물의 연소성 및 화재위험성 평가에 있어 가장 중요한 물리량으로 인식되는 열발생률(Heat releat rate)⁽⁸⁾의 측정은 여전히 고가의 장치에 의존하여 이루어지고 있다.

열발생률은 다양한 방법을 통해 측정될 수 있으며, 가장 간단하게는 연료소모량과 연소열(Heat of combustion)의 관계를 통해 측정될 수 있다⁽⁹⁾. 그러나 연소열이 불명확한 복합가연물의 연소에 적용되기 어려우며, 불완전연소로 인해 유효연소열에 변동이 발생하는 경우 측정오차를 가질 수 있다. 연소생성물의 엔탈피에 대한 직접 측정⁽¹⁰⁾을 통해 열발생률이 얻어질 수 있다. 이 방법은 시스템 구축비용이 낮고 간단하여 초기 열발생률 측정에 활용되었다. 그러나 연소생성물의 이동 과정에서 발생하는 열손실 정량화의 한계로 다양한 화재조건에 대한 적용에 어려움이 있다. 이로 인해 연소과정에서 생성 및 소모되는 화학종농도에 근거하여 화재환경 및 가연물에 구애받지 않는 측정법이 널리 활용된다. 이산화탄소생성법(Carbon dioxide generation calorimetry, CDG)⁽¹¹⁾과 산소소모법(Oxygen consumption calorimetry, OC)⁽¹²⁾이 대표적이다. CDG법은 연소 시 생성되는 CO₂ 및 CO의 단위질량당 열량이 13.3 MJ/kg, CO₂, 11.1 MJ/kg, CO로 비교적 일정하다는 사실⁽¹³⁾에 기반해 열발생률을 측정하게 된다. 이러한 측정원리는 연소과정에서 소모되는 산소의 단위질량 당 방출열량이 일정(13.1 MJ/kg, O₂)하다는 사실^(14,15)에 근거한 OC법과 매우 유사하다. 이들 두 측정시스템은 구조 및 원리가 유사하며, 특정 화재조건에 대해 동등한 측정성능을 갖지만 CDG 법의 경우 CO 및 soot이 다량 발생하는 환기부족화재 조건에서의 추가적 검증이 요구된다⁽¹⁶⁾. 이러한 검증 상의 한계로 인해 열발생률 측정에는 산소소모열량계가 일반적으로 활용된다.

앞서 언급된 것과 같이 산소소모열량계는 가연물의 종류, 불완전연소 등 화재조건과 관계없이 정확한 열발생률 측정이 가능하다. 이러한 장점에 의해 많은 연구소에서 활용되고 있으나 경제성의 측면에서 시스템의 구축비용이 높

다는 단점이 있다. 산소소모열량계 시스템은 크게 배기시스템 및 측정시스템으로 나눌 수 있다. 배기시스템의 경우 산소소모열량계의 규모 및 사용 목적에 따라 구축비용이 변화할 수 있다. 그러나 시스템의 규모와 관계없이 요구되는 가스(O₂ 및 CO/CO₂)농도 분석기는 시스템의 구축비용을 증가시키는 주요인이라 할 수 있다. 이들 장치는 전량이 수입에 의존해 유지보수가 용이하지 않으며, 높은 초기 비용에도 불구하고 산소소모열량계의 구축에 필수적으로 요구된다. 이로 인한 높은 구축비용의 단점은 장기적 관점에서 연구자변의 확대, 궁극적으로 화재안전의 확보를 저해할 수 있다. 따라서 온도, 열유속 및 연기농도 등의 측정장치와 같이 시스템 구축비용을 절감한 보급형 장치의 개발이 요구된다.

이러한 배경 하에 본 연구에서는 산소소모열량계의 구축비용을 증가시키는 요인으로 O₂ 및 CO/CO₂ 분석기를 선정하고 이를 대체할 수 있는 보급형 장치의 개발이 수행되었다. 이를 위하여 우선적으로 다양한 화재성장률을 갖는 화원을 대상으로 열발생률 측정에 대한 CO/CO₂ 분석기의 기여도가 평가되었다. 이를 통해 시스템에서의 CO/CO₂ 분석기의 제외 가능 여부가 검토되었다. 또한 고가형 O₂ 분석기를 대체할 수 있는 보급형 장치 개발을 위해 열발생률의 측정에 활용 가능한 산소센서의 최소 요구성능이 평가되었다. 평가 결과 기존의 고가형 분석기와 동일한 상자성(Paramagnetic) 방식의 헬스케어용 산소센서가 선정되었다. 선정된 산소센서를 이용하여 보급형 O₂ 분석기가 제작되었으며, 다양한 화재조건에 대한 고가 장치와의 측정결과 비교를 통해 보급형 장치의 성능이 평가되었다. 본 연구를 통한 보급형 O₂ 분석기의 개발은 연구자변의 확대 및 화재특성의 이해, 궁극적으로 화재안전 확보에 기여할 것으로 기대된다.

2. 산소소모열량계 및 산소센서

2.1 산소소모열량계 배경 이론

Figure 1은 일반적인 산소소모열량계의 시스템 구성을 나타낸다. 후드에 포집된 연소생성물은 배기덕트를 통해 배출된다. 이 때, 후드는 연소생성물과 주변의 대기를 함께 포집하게 된다. 이 경우 포집된 대기와 연소생성물의 질량을 분리해 고려하는 것이 불가능해 연소생성물만의 산소농도는 평가될 수 없다. 이로 인해 산소소모열량계에는 유입기에 포함된 산소의 소모 비율을 의미하는 산소소모계수(Oxygen depletion factor, ϕ) 개념이 도입되며, 식 (1)을 통해 정의될 수 있다.

$$\phi = \frac{X_{O_2}^{A''}(1 - X_{CO_2}^A - X_{CO}^A) - X_{O_2}^A(1 - X_{CO_2}^{A''})}{(1 - X_{O_2}^A - X_{CO_2}^A - X_{CO}^A)X_{O_2}^{A''}} \quad (1)$$

Figure 1. Schematic diagram of general oxygen consumption calorimeter.

여기서 X 는 배기류에 포함된 화학종의 체적분율, 상첨자 o 및 A 는 초기값과 분석기의 측정값을 의미한다. 참고로 본 연구에서 $X_{O_2}^A$ 는 0.2095, $X_{CO_2}^A$ 는 0.0004 (400 ppm)의 값으로 고려되었다. 산소소모열량계 시스템에서 산소소모계수를 산출하기 위한 각 화학종의 농도는 다음 과정을 통해 측정된다. 덕트를 흐르는 유동이 충분히 발달한 이후 배기류의 일부는 진공펌프에 의해 샘플링 된다. 샘플링 가스는 air conditioner 및 soot filter의 전처리 과정을 거친 뒤 가스 분석기로 유입되며, 이를 통해 배기류에 포함된 화학종의 농도가 측정된다. 또한 덕트에서는 배기류의 차압(Differential pressure), 온도가 측정되며 이로부터 배기류의 질량유량($\dot{m}_e$)이 도출된다. 이와 더불어 산소의 소모질량당 방출열량(E), 팽창계수(α)에 대한 고려를 통해 식 (2)에 의한 최종 열발생률($\dot{Q}$)이 산출될 수 있다. 본 연구는 보급형 O_2 분석기의 개발 및 적용성 평가가 주목적이므로, 식 (2)의 상세한 유도과정은 제시되지 않았다.

$$\dot{Q} = E \frac{\phi}{1 + \phi(\alpha - 1)} \dot{m}_e \frac{M_{O_2}}{M_a} (1 - X_{H_2O}^o - X_{CO_2}^o - X_{CO}^o) X_{O_2}^A \quad (2)$$

식 (1) 및 (2)을 통해 알 수 있듯, 열발생률의 산출에는 화학종 농도(O_2 , CO_2 및 CO)를 비롯한 질량유량, 온도 등 다양한 물리량의 실시간 측정이 요구된다. 특히 화학종 농도측정을 위해 요구되는 O_2 분석기 및 CO/CO_2 분석기는 산소소모열량계의 구축비용 증가를 야기하는 가장 큰 요인이라 할 수 있다. 문헌⁽¹²⁾에 따르면 산소소모계수의 산출식

은 고려된 화학종의 수에 따라 변화될 수 있다. 즉, O_2 만을 고려하는 식 (3)을 통해 산소소모계수가 산출될 수 있다. 이 경우 열발생률 측정의 정확도는 다소 감소될 수 있으나, CO/CO_2 분석기의 구매비용을 절감할 수 있다는 장점이 있다. 따라서 O_2 농도만이 고려되는 산소소모열량계의 적용성에 대한 평가는 산소소모열량계의 구축비용 절감에 유용할 수 있다.

$$\phi = \frac{X_{O_2}^A - X_{O_2}^o}{(1 - X_{O_2}^A) X_{O_2}^o} \quad (3)$$

그럼에도 불구하고 SIEMENS, SERVOMEX 등 산소소모열량계에 보편적으로 사용되는 O_2 분석기는 단일 화학종 농도의 측정을 위한 장치의 측면에서 여전히 높은 단가를 가진다. 이를 극복하기 위한 보급형 O_2 분석기의 개발 및 활용은 산소소모열량계의 구축비용 절감에 효과적일 수 있다.

2.2 헬스케어용 산소센서 및 보급형 O_2 분석기

공학 분야에서 산소농도는 다양한 기법을 통해 측정될 수 있다. 보급형 O_2 분석기 개발을 위해 다양한 센서들의 적용성에 대한 고찰이 이루어졌다. 대표적으로 상자성 센서(Paramagnetic sensor)는 기존의 O_2 분석기에 적용되는 센서로 산소의 상자성을 통해 농도를 측정하게 된다. 이 센서는 수명이 길고 안정적 신호를 제공하지만 상당히 고가이다. 전기화학식 센서(Electrochemical sensor)는 비교적 낮은 단가를 갖지만 수명이 짧고, 반응속도가 느려 실시간으로 변화하는 화재의 열발생률 측정에는 적합하지 않다. 또한

Figure 2. Measurement accuracy of heat release rate according to the number of effective digits for oxygen concentration.

자동차 엔진의 공연비 측정을 위해 사용되는 zirconia 센서의 적용성이 검토되었다. 이 센서는 반응속도가 빠르고 ppm 단위의 낮은 농도에 대한 측정이 가능하다는 장점이 있다. 그러나 적절한 측정성능을 나타내기 위해 일정온도 (500 °C) 이상으로 가열되어야 하며, 이로 인해 배기류에 미연 연료가 포함되어 있는 경우 사고의 가능성이 있다. 결론적으로 전기화학식 및 zirconia 센서는 내구성 및 안전성 문제로 산소소모열량계에 적용되기 어려우므로, 기존의 상자성 센서가 가장 적절할 것으로 판단할 수 있다. 이에 따라 비교적 낮은 단가의 상자성 센서를 이용한 O₂ 분석기를 제작하고 열발생률의 측정에 대한 적용성이 검토되어야 한다.

보급형 산소소모열량계의 구축에 앞서 산소센서의 최소 요구 사양이 검토되어야 한다. 연소 시 소모된 산소량을 통해 열발생률을 측정하는 산소소모법의 특성 상 센서의 최소 측정단위, 즉 분해능(Resolution)은 매우 중요한 성능이라 할 수 있다. 이에 산소센서의 최소 요구사양을 결정하기 위해 Mass flow controller (MFC)에 의해 제어된 propane gas를 대상으로 화재실험이 이루어졌다. 화원의 이론 열발생률은 10~55 kW 범위에서 4단계로 변화되었다. 이를 대상으로 단계별 정상상태에서 측정된 평균 O₂ 농도를 통한 열발생률 산출 시 고려되는 소수점 이하의 자릿수에 따라 이론 열발생률에 대해 갖는 상대오차가 평가되었다. 체적분율 관점에서 대기 중 산소농도는 0.2095의 네 자리(4 digits)의 값을 가진다. 이를 고려하여 비교 대상으로 3~6 digits가 선정되었으며, 산소농도는 고가형 O₂ 분석기(OXYMAT 61, SIEMENS)를 통해 측정되었다.

이러한 조건 하에 열발생률의 측정결과에 대한 비교가 Figure 2에 제시되었다. 그림을 살펴보면 4 digits 조건의 측정값은 계단식으로 증가하는 이론 열발생률에 대해 작은 오차를 보이며, 이러한 경향은 5~6 digits 조건에서도 동일

Table 1. Relative Error to the Ideal Heat Release Rate According to the Number of Effective Digits for the Oxygen Concentration

Phase	Relative error to ideal HRR (%)			
	3 digits	4 digits	5 digits	6 digits
1	37.2	10.1	10.4	10.4
2	7.3	1.4	1.5	1.5
3	5.3	1.8	1.9	1.9
4	5.4	3.0	2.9	2.9

하다. 그러나 3 digits의 조건의 경우 이론 열발생률과 비교할 때 과소 또는 과대측정에 따른 상당한 차이를 가진다. 이러한 차이에 의한 상대오차는 Table 1에서 정량적으로 확인될 수 있다. 4~6 digits 조건은 작은 이론 열발생률을 갖는 1단계에서 약 10%의 상대오차를 나타내며, 이후 2~4 단계의 조건에서는 3% 미만의 값을 갖는다. 반면 3 digits 조건은 1단계에서 약 40%로 약 네 배 큰 상대오차를 갖는다. 이론 열발생률의 증가에 따라 상대오차는 다소 감소되지만 5% 이상으로 여전히 비교적 큰 값을 갖는다. 이를 통해 최소한 소수점 이하 네 자리가 고려되어야 적절한 열발생률의 측정이 가능할 것임을 알 수 있다. 결론적으로 보급형 O₂ 분석기에 사용될 센서에 요구되는 최소 측정 단위는 백분율을 기준으로 0.01%임을 알 수 있다.

열발생률 측정에 요구되는 최소 요구 성능에 대한 검토를 통해 보급형 O₂ 분석기 제작에 활용될 산소센서가 선정되었다. 선정된 센서는 Pm1111E (SERVOMEX)로 기존 O₂ 분석기와 같이 상자성 원리에 의해 산소농도를 측정하며, 환자 및 운동선수의 혈중 산소농도 측정에 활용된다. Table 2에는 선정된 센서의 상세 사양 및 사진이 제시되었다. 센서의 측정범위는 0~100%이며, 산소농도에 따라 0~1 V의 출력신호를 제공한다. 장치의 정확성(Accuracy)은 0.1% 미만으로 출력값이 실제값에 대해 갖는 오차를 의미한다. 0.1% 미만의 오차는 체적분율의 관점에서 소수점 이하 네 자리까지의 측정이 가능한 것으로 볼 수 있으며, Figure 2 및 Table 1을 통해 검토된 최소 요구 성능을 만족한다. 반복성(Repeatability)은 정밀성과 같은 의미로, 동일한 조건에 대한 여러 번의 측정 결과들이 갖는 표준편차를 의미하며, 0.1% 미만의 작은 오차를 갖는다. 선형성(Linearity)은 실제 산소농도의 변위에 대한 측정결과의 변위가 갖는 오차를 의미하며, 0.1% 미만으로 뛰어난 측정성능을 가지고 있다. 결론적으로 센서의 상세 사양, 즉 최소 측정 단위 및 반복성, 선형성에 대한 검토 결과 보급형 O₂ 분석기 제작에 활용되는데 적절한 것으로 판단된다. 이에 따라 ㈜페스텍에서는 해당 센서를 활용한 보급형 O₂ 분석기의 제작이 수행되었다.

제작된 O₂ 분석기의 모습이 Figure 3에 제시되었다. Figure 3(a)에는 장치의 내부 구조, Figure 3(b)에는 외부 형상이 제시되었다. 상자성 센서의 특성상 고압에 취약하

Table 2. Detailed Specifications of the Oxygen Sensor for Healthcare Selected in the Present Study

Model (Manufacturer)	Pm1111E sensor (SERVOMEX)
Target gas	O ₂
Appearance
Technology	Paramagnetic alternating pressure method
Measuring range	0-100% O ₂ (0-1 V dc linear)
Accuracy	<± 0.1% O ₂
Repeatability	<± 0.1% O ₂
Linearity	<± 0.1% O ₂

(a)

(b)

Figure 3. Photos of the internal and external shape of the low-cost O₂ analyzer.

로, 장치 내부에는 센서에 유입되는 샘플링 가스의 압력을 조절하기 위한 레귤레이터 및 Auto flow control device

Figure 4. Fire growth curves considered in the present study.

(AFCD, SERVOMEX)가 설치되었다. AFCD는 릴리프 밸브와 유사한 구조로 샘플링 가스의 과유입에 의한 과압의 일부를 우회 배출하여 정해진 압력 및 유량만을 센서에 전달하고 센서를 보호한다. 사진 상 제시되지 않았으나, 측정을 위한 장치 이외에 전원공급을 위한 파워 서플라이 및 노이즈 필터가 적용되었다.

3. 실험조건 및 방법

O₂ 및 CO/CO₂ 분석기에 의한 산소소모열량계의 구축비용을 절감하기 위한 실험적 연구가 수행되었다. 측정 시스템의 구성에 따른 열발생률 측정 결과 및 이론 열발생률에 대한 상대오차의 비교를 통해 장치의 적용성이 평가되었다. 화원은 propane의 확산 화염으로 MFC를 이용해 제어된 유량이 공급되었다. 버너를 통한 화재성장곡선은 Figure 4와 같이 네 가지 조건이 고려되었다. 구체적으로 화재성장률은 time square law⁽¹⁷⁾에 근거한 slow~ultra-fast의 네 조건이 고려되었다. 최대 열발생률은 62.8 kW로 화재성장률과 관계없이 동일하게 설정되었다. 이와 같은 화재조건을 대상으로 두 가지 목적의 실험이 수행되었다. 먼저 산소소모열량계 시스템에서 CO/CO₂ 분석기의 제외 가능 여부가 검토되었다. 이를 위해 대표적 고가형 장치인 O₂ 분석기(OXYMAT 61)와 CO/CO₂ 분석기(ULTRAMAT 23)가 모두 적용된 산소소모열량계에서 Figure 4의 네 개 화재조건에 대한 열발생률이 측정되었다. 또한 동일한 실험에서 측정된 O₂ 분석기만의 결과를 통해 열발생률이 산출되었다. 이와 같은 두 시스템 구성으로부터 얻어진 열발생률이 이론 열발생률에 대해 갖는 상대오차 검토를 통해 CO/CO₂ 분석기의 제외 가능 여부가 검토되었다. 이후 본 연구에서 제작된 보급형 장치에 의한 고가형 O₂ 분석기의 대체 가능 여부를 검토하기 위해 Figure 4의 화재조건에 대한 실험이 수

Figure 5. Measurement result of heat release rate in unsteady condition depending on whether CO and CO₂ are measured.

행되었다. 이때, 실험의 재현성에 의한 오차 방지를 위해 고가형 및 보급형 O₂ 분석기의 측정이 동시에 이루어졌다. 이를 위해 배기덕트에서 샘플링 된 가스는 soot filter 및 air conditioner를 거친 이후 분기하여 각 분석기로 유입되었다.

모든 실험에서 측정된 열발생률은 화재성장이 이루어지는 비정상상태(Unsteady)와 최대 열발생률이 일정하게 유지되는 정상상태(Steady-state)를 구분하여 비교되었다. 화재성장단계에서의 측정값은 산소소모열량계의 응답성능과 관련지을 수 있다. 이를 검토하기 위하여 연료량에 따른 이론 열발생률과 시스템 구성에 따른 측정 열발생률의 화재성장계수(α)가 비교되었다. 이때, 측정 열발생률의 화재성장계수는 최소자승법에 의한 R² 값의 검토를 통해 도출되었다. Figure 4에서 고려된 모든 화재조건은 초기의 화재성장률과 관계없이 동일한 최대 열발생률을 가진다. 따라서 정상상태 측정값에 대한 검토는 각 분석기의 반복성에 대한 검토라 할 수 있다. 모든 화재조건에 대해 정상상태 구간은 200~400 s로 설정되었다. 이 구간에서 측정된 열발생률의 평균값이 이론 열발생률에 대해 갖는 상대오차가 검토되었다. 위 조건의 실험들을 통하여 산소소모열량계 구축비용의 증가요인으로 꼽히는 CO/CO₂ 분석기의 제외 가능 여부, 그리고 본 연구에서 제작된 보급형 장치에 의한 O₂ 분석기의 대체 가능 여부가 검토되었다.

4. 실험결과 및 분석

4.1 CO/CO₂ 분석기의 기여도 평가

다양한 화재성장률을 갖는 propane 확산화염을 대상으로 CO 및 CO₂ 농도의 고려 여부에 따른 측정결과의 비교가 이루어졌다. Figure 5에는 각 화재조건에 대한 두 시스템의 비정상상태 측정값과 이론값에 대한 비교가 제시되었다.

그림을 살펴보면 slow 화재성장률의 조건에서 열발생률의 측정값은 고려되는 화학종의 종류와 관계없이 이론적인 화재성장곡선과 상당히 일치하는 결과를 나타낸다. O₂ 농도만이 고려된 조건(Only O₂)에서 이론값에 대해 약간의 과대측정을 나타내지만 그 차이는 작다. 이러한 경향은 medium 및 fast 화재성장률의 조건에서도 동일하게 관찰된다. O₂ 농도만을 고려하는 경우 열발생률의 측정결과가 이론값에 대해 약간의 과대측정 경향을 나타내는 이유는 식 (1) 및 (3)에서 고려되는 화학종의 종류에 따라 분모와 분자의 비율, 즉 산소소모계수가 변화하기 때문이다. 그러나 그림에서 확인되는 것과 같이 그 영향은 매우 작다. Ultra-fast 조건에서 시스템의 구성에 따른 열발생률은 앞선 세 개의 화재성장곡선에 대한 측정과 다소 상이한 결과를 나타낸다. 두 시스템의 측정값은 이론 열발생률이 약 40 kW에 도달하는 시점까지 적절한 일치성을 나타낸다. 그러나 열발생률이 더욱 증가하는 조건에서는 이론값에 미치지 못하는 열발생률을 나타낸다. 이는 연료의 공급량이 짧은 시간 동안 큰 폭으로 변화하는 조건에서 MFC가 갖는 미세한 반응 지연에 의한 것으로 추정된다. 즉, MFC를 통해 공급되는 실제 연료량이 ultra-fast를 구현하기 위해 입력된 값에 도달하기 이전에 다음 단계로의 진행이 이루어져 40 kW 이후 시점에서는 ultra-fast에 미치지 않는 화재성장곡선이 구현된 것이다. 그림에도 불구하고 약 40 kW 시점까지의 비교를 통해 시스템 구성에 따른 측정성능의 검토가 가능하다. 이 구간에서 고려되는 화학종의 종류에 따른 측정결과는 큰 차이를 보이지 않는다. 결과적으로 O₂만을 고려하더라도 다양한 성장률을 갖는 화재에 대한 적용이 가능함을 알 수 있다. 이들 시스템의 적용성은 각 측정값으로부터 도출되는 화재성장계수에 대한 정량적 검토를 통해 보다 상세히 평가될 수 있다.

Table 3에는 시스템 구성에 따른 화재조건 별 화재성장계수와 이들 값이 기준값⁽¹⁷⁾에 대해 갖는 상대오차가 제시되었다. 화재성장계수는 각 측정값으로부터 최소자승법에 의해 얻어지는 R² 값에 대한 검토를 통해 도출되었다. 각 시스템에 따른 화재성장계수가 이론값에 대해 갖는 상대오차를 살펴보면 모든 화재성장률에 대해 CO 및 CO₂가 고려되는 조건이 비교적 작은 값을 갖는다. 이 때 최대 상대오차는 medium 조건에서 나타나며, 2.82%의 값을 갖는다. O₂ 농도만이 고려될 때 산소소모계수의 변화에 의한 약간의 과대측정이 Figure 5를 통해 확인되었다. 이 영향으로 화재성장계수의 상대오차는 비교적 큰 상대오차를 가지며, slow 조건에서 6.66%의 최대값을 나타낸다. 결과적으로 두 시스템의 비교에서 CO 및 CO₂가 고려될 때 비교적 뛰어난 측정성능을 나타낸다. 그러나 O₂만을 고려하더라도 모든 화재성장률에 대한 상대오차는 10% 미만이며, 준수한 측정성능을 갖는 것으로 볼 수 있다.

정상상태에 대한 측정성능 역시 산소소모열량계의 성능 평가에 있어 중요하다. Figure 6에는 정상상태의 구간(200~400

Table 3. Summary of Fire Growth Rate and Relative Error Depending on Whether CO and CO₂ are Measured

Fire growth rate (kW/s ²)	System	Value of α (kW/s ²)	Relative error (%)
Slow (0.002928)	with CO,CO ₂	2.92×10^{-3}	0.24
	Only O ₂	3.12×10^{-3}	6.66
Medium (0.0117)	with CO,CO ₂	1.14×10^{-2}	2.82
	Only O ₂	1.19×10^{-2}	1.71
Fast (0.0468)	with CO,CO ₂	4.69×10^{-2}	0.21
	Only O ₂	4.89×10^{-2}	4.49
Ultra-fast (0.1874)	with CO,CO ₂	1.83×10^{-1}	2.35
	Only O ₂	1.83×10^{-1}	2.35

s)에서 시스템 구성에 따라 측정된 평균 열발생률에 대한 비교가 제시되었다. 각 평균값과 함께 표준편차가 제시되었다. 정상상태 측정결과와 비교 결과 비정상상태 구간에 대한 검토와 동일하게 CO 및 CO₂가 고려될 때 정확한 측정이 가능함을 알 수 있다. 그러나 O₂만을 고려하는 조건에서 측정된 열발생률이 갖는 이론 열발생률과의 차이는 크지 않다. 시스템 구성에 따른 정량적 성능의 비교를 위하여 이론 열발생률에 대해 갖는 상대오차가 검토되었다. 화원은 화재성장률과 관계없이 동일한 최대 열발생률을 가지므로, 반복적인 실험에서의 최대 상대오차를 검토하는 것이 유효할 수 있다. 각 시스템의 최대 상대오차는 각각 1.5%, 4.3%로 약간의 차이는 있으나 두 시스템 모두 5% 미만의 값을 가진다. 이를 통해 O₂만이 측정되더라도 정상상태 화원에 대한 측정이 적절히 이루어짐을 알 수 있다. 그림에는 제시되지 않았으나, 측정값의 정확도와 더불어 여러 번의 실험에 대한 측정의 반복성 역시 검토되었다. CO 및 CO₂의 농도가 고려될 때, 4회의 반복실험에 대한 표준편차는 1.06 kW, O₂만을 고려하는 경우에는 1.03 kW로 차이를 나타내지 않았다. 결론적으로 비정상 및 정상상태 화원에 대한 열발생률의 측정성능, 반복성 검토를 통해 O₂만을 고려하더라도 적절한 열발생률 측정이 가능함을 확인하였다.

4.2 보급형 O₂ 분석기의 적용성 평가

산소소모열량계의 측정 정확도에 대한 CO/CO₂ 분석기의 기여도 평가를 통해 O₂만이 고려되더라도 적절한 열발생률의 측정이 가능함을 확인하였다. 그러나 기존의 고급형 O₂ 분석기 (SIEMENS 및 SERVOMEX) 역시 상당히 고가이므로, 보급형 장치에 의한 대체 가능성이 평가되었다. 이를 위해 Figure 4의 화원을 대상으로 한 화재실험을 통해 고가형 및 보급형 O₂ 분석기의 측정결과가 비교·분석되었다. Figure 7은 화재성장률에 따른 비정상상태에서 고가형 및 보급형 장치의 측정 열발생률에 대한 비교를 나타낸다. 여기서 Only O_{2,high}는 Figure 5의 Only O₂와 동일한 고가형 O₂ 분석기를 의미하며, Only O_{2,low}는 본 연구를 통해 제작

Figure 6. Comparison of average heat release rates for steady-state fire sources according to whether CO and CO₂ are measured. **Figure 7.** Comparison of heat release rate measured by high and low-cost O₂ analyzers for unsteady conditions.

된 보급형 O₂ 분석기를 의미한다. 그림을 살펴보면 Only O_{2,high} 조건은 Figure 5의 Only O₂ 조건과 동일하게 산소소모계수의 변화에 의한 약간의 과대측정을 제외하면 이론값에 대해 적절한 측정성능을 나타낸다. 보급형 장치에 의한 측정값을 나타내는 Only O_{2,low}의 경우 고가형 장치와 비교할 때 약간의 noise가 관찰되지만 다양한 화재성장곡선에 대한 측정은 적절히 이루어짐을 알 수 있다. 이러한 측정값의 noise는 보급형 장치의 한계인 것으로 볼 수 있으며, 실험 전반에 걸쳐 나타난다. 그럼에도 불구하고 연료 공급량에 따른 열발생률의 증가와 일정하게 유지되는 최대 열발생률에 대해 적절한 측정값을 제시하는 것을 통해 보급형 장치의 유효성을 확인할 수 있다. 비정상상태에 대한 보급

Table 4. Fire Growth Rate and Relative Error of Unsteady State Heat Release Rate Measured with High and Low-Cost O₂ Analyzers

Fire growth rate (kW/s ²)	System	Value of α (kW/s ²)	Relative error (%)
Slow (0.002928)	Only O _{2,High}	3.05×10^{-3}	4.17
	Only O _{2,Low}	3.17×10^{-3}	8.27
Medium (0.0117)	Only O _{2,High}	1.22×10^{-2}	4.10
	Only O _{2,Low}	1.29×10^{-2}	10.26
Fast (0.0468)	Only O _{2,High}	4.99×10^{-2}	6.62
	Only O _{2,Low}	5.15×10^{-2}	10.04
Ultra-fast (0.1874)	Only O _{2,High}	1.88×10^{-1}	0.32
	Only O _{2,Low}	1.94×10^{-1}	3.58

형 장치의 유효성을 상세히 분석하기 위하여 시스템 구성에 따른 화재성장계수의 상대오차가 정량적으로 검토되었다.

Table 4에는 다양한 화재성장률의 조건에 대한 측정 열발생률의 화재성장계수와 이론값에 대해 갖는 상대오차가 요약되었다. 고가형 장치(Only O_{2,High})의 경우 Table 3에 제시된 것과 같이 모든 화재성장률에 대해 10% 미만, fast 조건에서 최대 6.6%의 상대오차를 갖는다. 보급형 장치(Only O_{2,Low})에 의한 화재성장계수는 고려된 모든 화재성장률의 조건에서 고가형 장치보다 높은 상대오차를 갖는다. 이러한 오차는 앞서 언급된 것과 같이 헬스 케어를 위해 활용되는 보급형 산소 센서의 noise에 의한 것이다. 고려된 화재성장률에 대한 최대 상대오차는 medium 조건에서 10.26%로 제한적인 화학종의 고려, 보급형 센서의 사용에도 불구하고 준수한 측정성능을 나타낸다.

Figure 8에는 고가형 및 보급형 O₂ 분석기를 통해 정상상태(200~400 s)에서 측정된 평균 열발생률 및 표준편차가 제시되었다. 보급형 장치에 의한 측정 열발생률은 모든 화재성장률 조건에서 고가형 장치보다 높은 값을 가진다. 또한 평균값이 산출되는 구간에서 표준편차 역시 보급형 장치에서 상대적으로 큰 값을 갖는다. 이와 같은 차이는 보급형 O₂ 센서의 noise에 의한 것이다. 이를 통해 보급형 장치는 고가형 장치에 비해 비교적 낮은 측정성능을 가짐을 알 수 있다. 그럼에도 불구하고 각 O₂ 분석기의 측정값이 이론 열발생률에 대해 갖는 최대 상대오차를 살펴보면 고가형 장치의 경우 6.1%, 보급형 장치는 8.8%로 매우 작은 차이를 보인다. 또한 그림에 제시되지 않았으나 각 장치의 4회 반복실험에 대한 표준편차는 고가형 장치의 경우 0.75 kW, 보급형 장치의 경우에는 0.92 kW로 차이를 나타내지 않았다. 결과적으로 다양한 화재성장률을 갖는 화원을 대상으로 수행된 실험에서 헬스 케어용 산소센서를 활용해 제작된 보급형 O₂ 분석기가 이론 열발생률에 대해 갖는 상대오차는 10% 내외이다. 미국립표준기술연구소(National institute of

Figure 8. Comparison of average heat release rates measured by high and low-cost O₂ analyzers for steady-state fire sources.

standards and technology, NIST)에 위치한 3 MW급 산소소모열량계에 대한 신뢰성 검증 결과 확인된 측정 불확실도가 11.25%임을 고려할 때^(18,19), 보급형 장치의 오차는 시스템 규모 차이에도 불구하고 준수한 것으로 판단된다. 또한 반복성에 대한 검토에서도 보급형 장치는 고가형 장치와 차이를 나타내지 않았다. 이를 고려할 때, 본 연구를 통해 제작된 보급형 O₂ 분석기는 열발생률의 측정에 적용이 가능할 것으로 판단된다.

5. 결 론

본 연구에서는 산소소모열량계 구축비용 절감을 위해 헬스 케어용 산소센서를 활용한 보급형 O₂ 분석기가 제작되었다. 제작된 장치의 적용성을 검토하기 위하여 다양한 화재성장률을 갖는 propane 확산화염을 대상으로 비정상 및 정상상태에 대한 열발생률 측정결과가 검토되었다.

1) 보급형 O₂ 분석기에 사용될 산소센서의 요구 성능을 검토하기 위하여, 산소농도 측정결과와 유효 자릿수에 따른 열발생률의 측정결과가 검토되었다. 그 결과 체적분율 관점에서 소수점 이하 네 자리가 측정되어야만 적절한 열발생률의 측정이 가능함을 확인하였다.

2) 산소소모열량계 구축비용 증가의 주요인인 CO/CO₂ 분석기의 시스템 상 제외 가능 여부가 검토되었다. 그 결과 O₂ 농도만이 측정되는 시스템에서 비정상 및 정상상태 열발생률에 대한 측정오차는 10% 미만으로 CO 및 CO₂ 분석기가 제외되더라도 적절한 측정이 가능함을 확인하였다.

3) 최소 요구성능을 만족하는 헬스 케어용 산소센서를 이용한 보급형 O₂ 분석기가 제작되었다. 이를 활용한 고가형 장치의 대체 가능성 검토 결과, 비정상 및 정상상태에 대한 보급형 장치의 측정오차는 10% 내외로 열발생률 측

정에 적절히 활용될 수 있음을 확인하였다.

해당 장치는 산소소모열량계 구축비용의 절감을 통한 연구저변의 확대, 나아가 다양한 화재조건에 대한 실험 및 분석을 통해 화재안전의 확보에 기여할 것으로 기대된다.

후 기

이 논문은 2019학년도 대전대학교 교내학술연구비 지원에 의해 연구되었음.

References

1. National Fire Agency, "2019 Fire Statistical Yearbook" (2019).
2. E. Zalok, G. V. Hadjisophocleous and J. R. Mehaffey, "Fire loads in commercial premises", *Fire and Materials*, Vol. 33, pp. 63-78 (2009). <https://doi.org/10.1002/fam.984>.
3. A. Lönnermark and H. Ingason, "Fire spread in large industrial premise and warehouses", SP report 2005:21, SP Technical Research Institute of Sweden (2005). <https://rib.msb.se/Filer/pdf/23962.pdf>.
4. K. McGrattan, A. Lock, N. Marsh, M. Nyden, S. Bareham and M. Price, "Cable Heat Release, Ignition, and Spread in Tray Installations During Fire (CHRISTIFIRE) Phase 1: Horizontal Trays", NUREG/CR-7010 Vol. 1, United States Nuclear Regulator Commission (2012). <https://www.nrc.gov/docs/ML1221/ML12213A056.pdf>.
5. H. S. Han and C. H. Hwang, "Development and Validation of Simple-Shield Thermocouple in Fire Environment", *Journal of Fire Sciences*, Vol. 39, pp. 53-71 (2020). <https://doi.org/10.1177/0734904120963812>.
6. H. S. Yun, H. S. Han and C. H. Hwang, "Development and Calibration of Reduced-Size Plate Thermometer for Measuring Incident Heat Flux", *Journal of Fire Sciences*, Vol. 39, pp. 19-35 (2020). <https://doi.org/10.1177/0734904120958602>.
7. B. J. Kim, J. H. Cho, C. H. Hwang and S. H. Park, "A Study on the Development of a Low-cost Device for Measuring the Optical Smoke Density", *Fire Science and Engineering*, Vol. 29, No. 4, pp. 81-88 (2015). <https://doi.org/10.7731/KIFSE.2015.29.4.081>.
8. V. Babrauskas and R. D. Peacock, "Heat release rate: The single most important variable in fire hazard", *Fire Safety Journal*, Vol. 18, pp. 255-272 (1992). [https://doi.org/10.1016/0379-7112\(92\)90019-9](https://doi.org/10.1016/0379-7112(92)90019-9).
9. ISO 17554, "Reaction to Fire tests - Mass Loss Measurement", International Standards Organization, Geneva, Switzerland (2014).
10. ASTM E906, "Test Method for Heat and Visible Smoke Release Rates for Materials and Products", American Society for Testing and Materials, West Conshohocken, PA (1999).
11. A. Tewarson and S. D. Ogden, "Fire Behavior of polymethylmethacrylate", *Combustion and Flame*, Vol. 89, No. 3, pp. 237-259 (1992). [https://doi.org/10.1016/0010-2180\(92\)90013-F](https://doi.org/10.1016/0010-2180(92)90013-F).
12. V. Babrauskas and S. J. Grayson, "Heat Release in Fires", Elsevier Science Publishers Ltd., London, UK (1992). <https://doi.org/10.1002/fam.810040405>.
13. A. Tewarson, "Generation of Heat and Chemical Compounds in Fires", *SFPE Handbook of Fire Protection Engineering*, 3ed. Section 3 - Chapter 4, NFPA Press, Boston (2002).
14. W. M. Thornton, "The Relation of Oxygen to the Heat of Combustion of Organic Compounds", *Philosophical Magazine Series 6*, 33:194, pp. 196-203 (1917). <https://doi.org/10.1080/14786440208635627>.
15. C. Huggett, "Estimation of Rate of Heat Release by Means of Oxygen Consumption Measurements", *Fire and Materials* Vol. 4, No. 2, pp. 61-65 (1980). <https://doi.org/10.1002/fam.810040202>.
16. S. C. Kim, "Measurement of Heat Release Rate by Carbon Dioxide Generation Method for Methane Fire", *Fire Science and Engineering*, Vol. 34, No. 2, pp. 1-6 (2020). <https://doi.org/10.7731/KIFSE.1e176e77>.
17. NFPA 92B: "Smoke management systems in malls, atria, and large spaces" (1991).
18. R. A. Bryant and G. W. Mulholland, "A Guide to Characterizing Heat Release Rate Measurement Uncertainty for Full-scale Fire Tests", *Fire and Material*, Vol. 32, pp.121-139 (2008). <https://doi.org/10.1002/fam.959>.
19. R. A. Bryant, T. J. Ohlemiller, E. R. Johnsson, A. Hamins, B. S. Grove, G. W. Guthrie, A. Maranghides and G. W. Mulholland, "The NIST 3 MW Quantitative Heat Release Rate Facility-Description and Procedures", NISTIR 7502 (2004). <https://nvlpubs.nist.gov/nistpubs/Legacy/SP/nistspecialpublication1007.pdf>.