

[Research Paper]

가솔린 풀 화재에서 인체 호흡량 변화를 고려한 연소가스 농도 측정 결과 분석

최승일 · 강정기* · 유우준**†

동양대학교 건축소방안전학과 학부생, *대검찰청 화재수사팀 수사관, **동양대학교 건축소방안전학과 교수

Analysis on the Results of Measured Concentration of the Combustion Gases Considering Respiration Characteristics in Gasoline Pool Fire

Seung Il Choi · Jung Ki Kang* · Woo Jun You**†

University Student, Dept. of Architecture & Fire Safety, Dong Yang Univ.

*Investigator, Supreme Prosecutor's Office,

**Professor, Dept. of Architecture & Fire Safety, Dong Yang Univ.

(Received February 19, 2019; Revised August 15, 2019; Accepted August 21, 2019)

요 약

본 연구에서는 가솔린 풀화재 시 호흡량과 호흡주기 변화에 따라서 인체에 흡입되는 연소가스 농도에 관한 기초 연구를 수행하였다. 이를 위해서 ISO 9705 룸코너 시험기의 1/4 크기인 구획공간을 제작하였으며, 호흡유량 (2, 6, 10) LPM 에 대해서 연소가스를 지속적으로 흡입하는 경우(Infinity)와 호흡주기가 2 s와 5 s인 각각의 경우 일산화탄소와 산소 농도를 측정하였다. 그 결과 구획 공간에서 가솔린 풀화재의 이론 발열량이 5.34 kW인 연소조건에서 산소와 이산화탄소의 경우 모두 호흡주기에 비해서 호흡량이 증가함에 따른 농도 편차가 더욱 높은 것을 확인하였다. 또한, 호흡 주기가 증가함에 따라서 산소 농도의 경우 최소값의 변화가 평균값에 비해서 더욱 크게 나타난 반면 일산화탄소 농도의 경우 평균값의 변화가 최대값에 비해서 더욱 크게 나타났다. 이러한 결과는 화재 시 피난자의 호흡 특성에 따라서 실제 흡입되는 유해가스의 농도를 고려하여야 보다 정확한 피난 특성을 예측할 수 있는 것으로 사료된다.

ABSTRACT

This study examined the concentration of combustion gases while considering low ventilation and respiration frequency. A one-quarter-size ISO 9705 room corner test was performed. The concentrations of carbon monoxide and oxygen were measured in each case with the continuous inhalation of combustion gas with low ventilation (2, 6, and 10 LPM) and different respiration frequencies (2 s, 5 s, and infinity). The combustion of a gasoline pool fire in the compartment had a theoretical heat release rate of 5.34 kW. The results show that the deviation of the gas concentrations becomes higher as the low ventilation increases compared to the respiration frequency. In addition, as the respiration frequency increases, the variation in the minimum oxygen concentration is larger than the average value, while in the case of carbon monoxide, the variation in the average value is larger than the maximum value. These results show that the inhalation characteristics of refugees should be considered to investigate fires.

Keywords : Minute ventilation, Respiration frequency, Combustion gases, Gasoline pool fire, Fire investigation

† Corresponding Author, E-Mail: wjyou98@naver.com. TEL: +82-54-630-1297, FAX: +82-54-630-1371

© 2019 Korean Institute of Fire Science & Engineering. All right reserved.

1. 서 론

화재가 발생하면 가연성 물질이 발화하는 과정에서 생성된 유독가스가 인체의 호흡기관으로 유입되어 호흡장애와 혈압상승 등 생명에 치명적인 효과를 발생시키게 된다^(1,2,3). 그레이엄의 확산 법칙에 따르면 일정한 압력과 온도에서 기체의 확산 속도는 분자량의 제곱근에 비례하여 열이 주변으로 전달되는 속도보다 빠르기 때문에 화재로 인한 인명 피해는 열원에서 발생된 열기보다 유독 가스의 흡입에 의해서 더 크게 발생하게 된다^(4,5). 화재 시 유독가스의 생성은 가연성 물질이 주변의 산화제와 혼합하면서 불완전 연소가 발생하는 경우 나타나게 되며, 기존 연구사례에 따르면 유독가스 중 이산화탄소(Carbon dioxide, CO₂)가 대기 중 30% 이상일 때 산소 결핍에 의한 질식 상태에 다다를 수 있으며, 일산화탄소(Carbon monoxide, CO)의 경우 혈액 중의 COHB가 20~30%가 되면 중독증상이 나타나고 50%에서는 의식이 상실되며, 60%에 달하면 사망할 수 있다고 보고하고 있다⁽⁶⁾.

유해가스가 인체에 미치는 영향을 분석한 기존 연구 사례로 국내의 경우 Kim 등은 콘칼로리미터와 Fourier Transform Infrared Spectroscopy (FTIR)을 사용하여 합판, 카펫, 우레탄 등 가연성 물질의 주요 성분과 연소 생성물의 종류를 분석하였으며, Fractional Effective Dose (FED)를 이용하여 독성지수 산정에 관한 연구를 수행하였다⁽⁷⁾. Sim 등은 FTIR을 사용하여 화재 시 젖은 수건의 유독가스 차단 효과에 관한 기초 실험을 수행하였으며, 그 결과 염화수소(Hydrogen chloride, HCl)와 사이안화수소(Hydrogen cyanide, HCN)의 경우 수분 67%의 젖은 수건이나 수분 97% 휴지로 유독가스의 흡입을 일정 시간 지연할 수 있음을 확인하였다⁽⁸⁾. Kim 등은 고온 환경에서 일정한 동맥이산화탄소분압을 유지한 조건에서의 저산소 호흡이 안정 시 인체의 환기 및 심혈관계 반응에 어떠한 영향을 미치는가를 분석하였고 연령 및 신체조건이 비슷한 6명의 사람을 대상으로 상온과 고온 환경에서 동일조건으로 실험을 수행하였으며 혼합가스를 공기유량제어장치로 전달할 수 있도록 하였다. 그 결과 안정 시 심부온도가 고온환경에서 상온환경보다 2 °C 상승되었고, 약 86%의 환기량 증가율을 나타내었으며 고온환경과 저산소환경의 복합적인 환경자극이 심혈관계반응의 변화를 야기하였다고 분석하였다⁽⁹⁾. 국외의 경우 Shelly⁽¹⁰⁾는 폐가 손상된 경우 인체 내부에서 산소의 운반 능력이 저하될 수 있는 현상을 수학적으로 모델링하여 실험결과와 비교하는 연구를 제시하였으며, Tang⁽¹¹⁾은 폐질환으로 호흡곤란에 의한 사망이 발생하는 현상을 평가하기 위해서 이산화탄소 함량에 따른 사망 및 폐의 산소 분압(Alveolar oxygen pressure)에 관한 연구를 수행한 바 있다.

선행 연구 결과에 따르면 유해가스 유입 등으로 인해서 폐가 점진적으로 손상되는 경우 인체 내부에서 발생할 수 있는 유해한 현상에 관한 연구가 활발히 수행되고 있는 것

을 확인할 수 있다. 하지만, 화재 시 정확한 사망 시간을 추정하기 위해서는 실시간 인체에 유입되는 유해가스 흡입량 변화에 따라서 호흡 질환이 발생하는 원인을 분석해야 할 것으로 판단되며, 화재로 인해서 발생된 연소가스와 호흡 특성을 고려한 피난자의 이상 행동 특성에 관한 연구 자료는 부족한 상태이다. 특히, 화재사고 시 유해 가스 흡입에 의해서 피난자가 사망한 시간이 방화와 실화를 판단하는 결정적인 근거가 되는 사건의 경우 실시간 유해가스를 흡입하는 농도에 따라서 피난 활동이 달라지기 때문에 인체 호흡량 변화와 유해가스 흡입의 상관관계를 분석한 기초 실험 자료가 매우 중요할 것으로 사료된다. 따라서 본 연구에서는 사람의 호흡 상태를 고려하여 호흡량과 호흡 주기 변화에 따른 일산화탄소와 산소농도 그리고 이산화탄소의 농도 변화를 측정하기 위한 기초 실험을 수행하고자 한다.

2. 본 론

2.1 연구 범위

Figure 1은 일반적인 인체 호흡 구조와 화재 시 흡입되는 연소 가스의 개략도를 나타낸 것으로 그래프에서 보듯이 분당 환기량(Minute ventilation)은 1회 호흡량(Tidal volume)과 분당 호흡수(Respiration frequency)에 의해서 결정되며, 식 1과 같이 표현할 수 있다⁽¹²⁾.

$$\dot{V} = V_T \times f \tag{1}$$

여기서 \dot{V} , V_T 그리고 f 는 각각 분당 환기량, 1회 호흡량 그리고 분당 호흡수를 나타낸다. 일반적으로 정상적인 성인의 안정 시 1회 호흡량은 400~600 ml 정도이며, 분당 호흡수는 10~25회 정도이므로 분당 환기량은 4~15 LPM 정도의 값을 갖게 된다. 또한, 호흡은 폐환기, 폐포 공기와 혈액 사이의 가스교환, 혈액에 의한 산소와 이산화탄소의 운반을 의미하는 외호흡과 혈액과 조직세포 사이의 가스교환

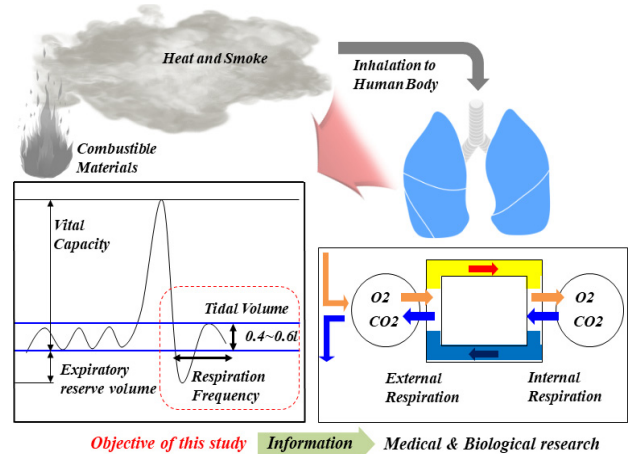


Figure 1. Schematic diagram of the study scope.

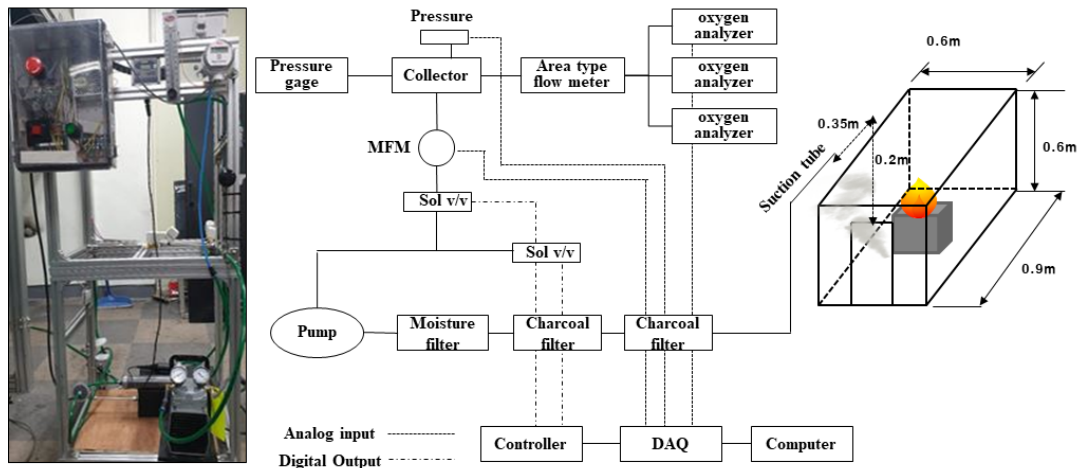


Figure 2. Schematic diagram and picture of experiment.

Table 1. Compartment and Experiment Specification

Components	Specification
Compartment	Fire-board, W 0.9 m, L 0.6 m, H 0.9 m
DAQ	Rate 10 ms, Model : GL 840 (20 Ch)
O ₂ Analyzer	Model : OXY3690MP
MFM (Electronic)	Range : 2~100 LPM, Accuracy ± 3% Pressure Range : -100~750 kPa, Output : 1~5 V, Power : 24 V
Pressure Gauge	Range : 0~1250 Pa, Power : 24 V Accuracy : ± 1%, Output : 1~5 V
Solenoid Valve	Power : 24 V, Orifice : 3 inch Fluid : Vacuum
Pump	Range : 32 LPM, Power : 24 V (60 Hz) Max Pressure : 60 psi Maximum Vacuum : 25.5 Hg

Table 2. Experiment Conditions

Combustion Products	Minute Ventilation [LPM]	Frequency [s]
Oxygen, O ₂ Carbon Dioxide, CO ₂ Carbon Monoxide, CO	2	2
		5
		Infinity
	6	2
		5
		Infinity
10	2	
	5	
	Infinity	

및 조직세포의 산소 이용과 이산화탄소 생성을 의미하는 내 호흡으로 구분된다⁽¹³⁾. 따라서 화재 시 환기량은 주위로부터 흡입되는 기체와 인체의 에너지 대사 과정 및 혈액으로부터의 세포호흡 과정에 중요한 영향을 받게 된다⁽¹⁴⁾. 즉, 화재 시 피난자의 분당 환기량에 영향을 주는 외호흡과 내호흡의 상관관계를 보다 정확하게 분석하기 위해서는 호흡 특성에 따라서 인체에 흡입되는 연소 생성물의 실제 농도를 분석할 필요가 있으며, 본 연구에서는 기초 연구로 구획 공간에서 가솔린이 연소하는 동안 발생하는 연소가스에 대해서 호흡량과 호흡 주기 변화에 따른 농도 변화를 분석하고자 한다.

2.2 실험장치 구성 및 조건

Figure 2는 본 연구를 위해서 제작한 실험장치 개략도와 사진을 나타낸 것으로 호흡량 변화에 따른 산소 농도를 측정하기 위해서 진공펌프를 사용하여 분석기로 유량이 공급될 수 있도록 배관을 제작하였으며, DAQ의 점접 신호에

의해서 솔레노이드 밸브를 제어하여 호흡량 및 호흡시간을 조절할 수 있도록 프로그램을 구성하였다. 가연성 물질의 발화와 인체 호흡량 변화를 고려한 별도의 시험규격은 현재 없는 상태이기 때문에 구획 공간은 내화보드 재질을 사용하여 ISO 9705 실험장치의 1/4의 크기인 가로 0.6 m 세로 0.9 m 그리고 높이 0.6 m인 구조물을 제작하였으며, 가솔린 풀 화재 실험을 위한 화원의 크기는 0.1 m × 0.1 m로 약 5.23 kW의 발열량이 생성되는 조건을 구성하였다. 본 연구에서 사용한 계측장비의 세부 사항은 Table 1에 나타내었다. 기존 문헌 자료에 의하면 일반 성인의 1회 호흡량은 400~600 ml 정도이며, 들숨과 날숨의 반복 시간은 분당 15~18회 정도로 보고되고 있다. 하지만, 운동을 한 상태 또는 긴장된 상태에서 평균 호흡량과 호흡 횟수가 증가하여 평균 호흡량의 크기는 5 LPM 이상 높아질 수 있다. 따라서 본 연구에서는 Table 2와 같이 안정적인 호흡 상태를 2 LPM, 심장 박동 수가 증가한 상태를 10 LPM 그리고 중간

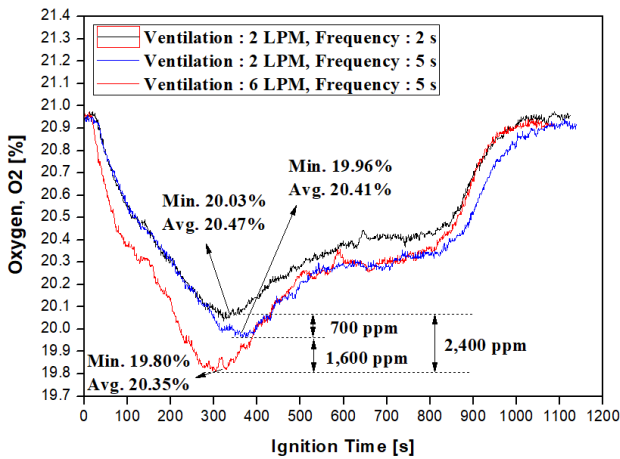


Figure 3. Oxygen % results of Test #1, #2 and #3 in table 2 for gasoline pool fire 5.23 kW.

정도를 6 LPM으로 가정하였으며, 호흡 주기를 2초와 5초로 하여 실험 조건을 구성하였다. 여기서 ‘infinity’의 의미는 호흡 특성을 고려하지 않고 연속적으로 연기를 흡입하는 상태를 의미하며, 호흡 특성 변화에 따른 연소가스의 농도를 분석하기 위해서 측정값의 최대/최소값과 식 (2)의 시간 평균 값을 적용하였다.

$$Avg = \frac{\int_{t_0}^{t_{final}} \eta dt}{(t_{final} - t_0)} \quad (2)$$

여기서 Avg, t_{final} , t_0 , η 그리고 dt 는 각각 시간 평균값, 최종 시간, 초기 시간, 연소가스, 그리고 시간간격을 각각 의미한다.

2.3 결과 및 분석

Figure 3은 구획공간에서 약 5.23 kW 정도의 가솔린이 발화할 때 출입구에서 상부 지점으로 20 cm 정도 이격된 거리에서 분당 호흡량-주기가 2 LPM-2 s, 2 LPM-5 s 그리고 6 LPM-5 s 각각의 경우 산소 농도의 감소량을 측정된 결과이다. 그림에서 보듯이 호흡량과 호흡 주기가 가장 작은 값에 해당하는 2 LPM-2 s의 경우 산소 농도의 최소값은 20.03%로 가장 작게 감소한 것을 확인할 수 있으며, 호흡량이 2 LPM으로 동일한 조건에서 호흡 주기가 5 s 증가한 2 LPM-5 s의 경우 산소 농도의 최소값이 700 ppm 감소한 것을 확인할 수 있다. 특히, 호흡량이 6 LPM이고 호흡 주기가 5 s인 6 LPM-5 s의 경우 산소 농도는 19.8% 정도의 최소값을 갖게 되어 호흡량과 주기에 따라서 최대 2,400 ppm 정도의 차이가 발생하는 것으로 나타났다. 또한, 식 (2)에 의한 시간-평균값의 경우에도 호흡량과 호흡 주기가 증가할수록 산소농도가 감소하는 것을 확인할 수 있다.

Figure 4는 구획공간에서 약 5.23 kW 정도의 가솔린이

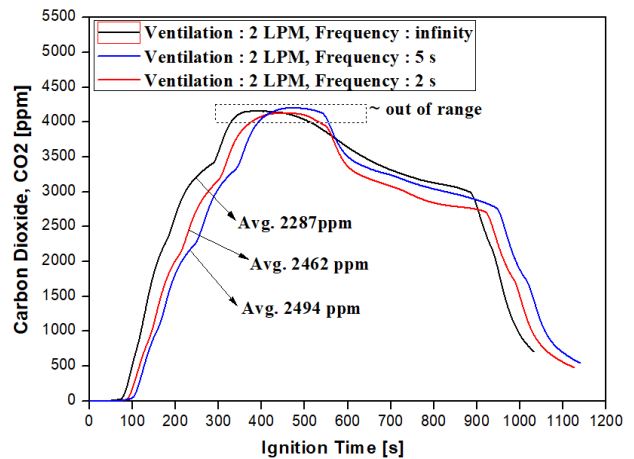


Figure 4. Carbon dioxide ppm results of Test #4, #5 and #6 in table 2 for gasoline pool fire 5.23 kW.

발화할 때 출입구에서 상부 지점으로 20 cm 정도 이격된 거리에서 분당 호흡량-주기가 2 LPM-2 s, 2 LPM-5 s 그리고 2 LPM-infinity 각각의 이산화탄소 측정 결과를 보여주고 있다. 그림에서 보듯이 동일 호흡량인 경우 이산화탄소의 최대값은 약 4200 ppm 정도로 호흡주기와 독립적으로 일정한 값을 갖는 것을 확인할 수 있으며, 시간 평균한 이산화탄소는 2287~2494 ppm로 약 207 ppm 정도의 차이가 발생하여 2 LPM-2 s의 값이 가장 큰 것으로 나타났다. 하지만, 본 연구에서 사용한 계측기의 최대 측정 범위는 4,500 ppm 정도로 물리량의 환산 이전 전압의 최대값을 확인한 결과 허용 측정 범위를 초과하였으며, 본 연구의 결과로 정확한 분석은 어려운 것으로 판단된다.

Figure 5는 가솔린 풀 화재의 동일 연소 조건에서 출입구에서 상부 지점으로 20 cm 정도 이격된 거리에서 분당 호흡량-주기가 2 LPM-infinity, 10 LPM-5 s 그리고 10 LPM-infinity 각각의 경우 일산화탄소의 측정 결과이다. 호흡유량 2 LPM과 10 LPM 각각의 경우 모두 호흡주기가 연속적일 때 일산화탄소의 최대값은 약 76 ppm 정도로 일정한 값을 갖는 것을 확인할 수 있다. 하지만, 10 LPM으로 동일 호흡량 조건에서 호흡주기가 5 s인 경우 최대값은 68 ppm 정도이며, 시간-평균 값이 52 ppm 정도로 호흡주기가 감소함에 따라서 일산화탄소의 흡입량이 비례하여 약 8 ppm 정도 낮아진 것을 확인할 수 있다. 하지만, 호흡유량 2 LPM으로 호흡 주기가 연속적인 경우의 시간 평균값은 55 ppm 정도로 호흡 유량 10 LPM이고 호흡주기가 5 s인 경우와 약 3 ppm 정도의 차이가 나타났다.

Figure 6은 산소농도 실험의 최소값과 평균값 그리고 일산화탄소 실험의 최대값과 평균값을 적용하여 호흡량 변화에 따른 농도와 호흡주기 변화에 따른 농도를 비교한 결과이다. 그림에서 보듯이 산소와 이산화탄소의 경우 모두 호흡주기에 비해서 호흡량의 변화에 따른 농도 편차가 더욱 높게 나타난 것을 확인할 수 있다. 또한, 호흡 주기에 따른

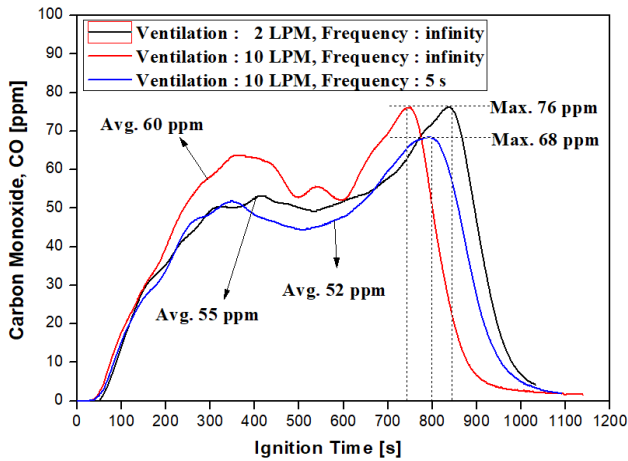


Figure 5. Carbon monoxide ppm results of Test #7, #8 and #9 in table 2 for gasoline pool fire 5.23 kW.

농도에서 산소와 일산화탄소 모두 최소값과 평균값 변화가 비슷한 결과로 나타났으며, 호흡주기에 따른 농도의 경우 산소농도는 최소값의 변화가 더욱 크게 나타난 반면 일산화탄소의 농도는 평균값의 변화가 더욱 크게 나타났다.

3. 결 론

본 연구에서는 ISO 9705 룬코너 시험기의 1/4 크기인 구획공간에서 약 5.23 kW 정도의 가솔린이 연소하는 경우 구획공간에서 방출된 연기의 유동을 고려하여 출입구 상부 지점으로부터 20 cm 정도 이격된 거리에서 산소농도와 일산화탄소의 농도를 분석하였으며 다음과 같은 결과를 분석하였다.

첫째, 호흡량과 호흡주기 변화에 따른 산소농도를 측정하여 최소값과 평균값을 산출한 결과 호흡량이 2 LPM이고 호흡 주기가 2 s인 경우 산소 농도의 최소값은 20.03%이고 평균값은 20.47%로 가장 작게 감소하였으며, 동일 호흡량에서 호흡주기가 5 s로 증가한 경우 산소 농도 최소값은 19.96%이고 평균값은 20.41%로 감소하였다. 또한, 호흡량이 6 LPM이고 호흡주기가 5 s인 경우 산소농도의 최소값과 평균값은 19.80%와 20.35%로 나타나는 것을 확인하였다. 이러한 결과는 호흡량과 호흡주기가 증가함에 따라서 인체 내부로 유입되는 산소농도가 감소하는 것을 의미하며, 이에 비례하여 가연성 물질의 연소에 의한 유해가스의 흡입이 증가하게 되어 피난자의 특성이 달라질 수 있는 것으로 사료된다.

둘째, 동일 연소 조건에서 호흡유량 2 LPM과 10 LPM 각각의 경우 호흡주기가 연속적일 때 일산화탄소의 최대값은 약 76 ppm 정도로 동일하였으며, 호흡유량 10 LPM이고 호흡 주기가 5 s인 경우 최대값은 68 ppm 정도로 감소하였다. 하지만, 평균값의 경우 호흡유량이 10 LPM일 때 호흡 주기 5 s와 연속적인 경우 각각에 대해서 60 ppm과 52 ppm

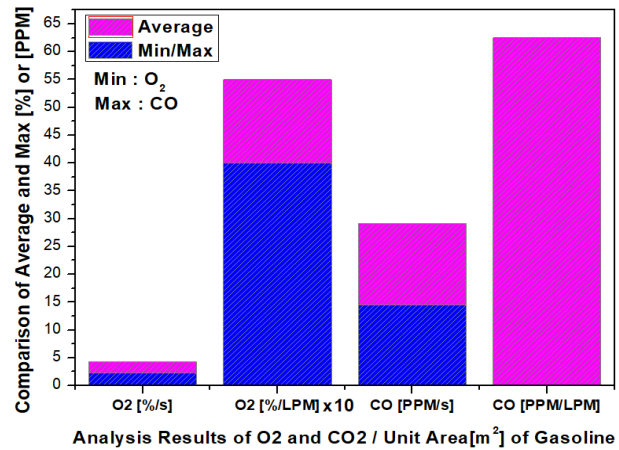


Figure 6. Comparison of the average and Min/Max values of oxygen and carbon monoxide concentration.

으로 호흡주기가 증가할수록 평균값의 크기도 비례하여 증가하는 것을 확인하였다. 즉, 피난활동이 활발할수록 호흡량이 증가되는 조건에서 일산화탄소 등 유해가스의 평균 변화가 높기 나타나기 때문에 인체 내부에서 발생할 수 있는 폐의 손상 등은 더욱 빠르게 나타날 수 있으며, 보다 정확한 결과를 도출하기 위해서는 다양한 호흡 특성을 고려한 연구가 선행되어야 할 것으로 판단된다.

셋째, 산소농도의 최소값과 일산화탄소의 최대값 그리고 각각의 실험에 대한 평균값을 산출하여 호흡량과 호흡주기에 따른 농도 변화를 분석한 결과 산소와 일산화탄소의 경우 모두 호흡주기에 비해서 호흡량이 증가함에 따라서 농도 편차가 더욱 높게 나타날 수 있는 것으로 판단된다. 또한, 호흡 주기에 따른 농도 변화를 분석한 결과 산소와 일산화탄소 모두 최소값과 평균값의 편차는 비슷하게 나타났으며, 산소 농도는 최소값의 변화가 평균값에 비해서 더욱 크게 나타난 반면 일산화탄소의 농도는 평균값의 변화가 최대값에 비해서 더욱 크게 나타났다. 하지만, 본 연구의 경우 축소된 구획공간에서 가솔린 화원 직경이 0.01 m²로 매우 작은 경우로 호흡 특성에 따른 농도 변화를 정량화하기 위해서는 보다 다양한 조건에서 상관관계의 분석이 필요할 것으로 판단된다.

References

1. K. H. Sung, K. C. Ro and H. S. Ryou, "Numerical Analysis on the Flow Characteristics Regarding the Inspiratory Flow Rate in a Human Airway", Korean Society For Computational Fluids Engineering, pp. 148-154 (2012).
2. R. D. Treitman, W. A. Burgess and A. Gold, "Air Contaminants Encountered by Firefighters", American Industrial Hygiene Association Journal, 41.11 (1980).
3. R. G. Gann, J. D. Averill, K. M. Butler, W. W. Jones, G.

- W. Mulholland, J. L. Neviasser, T. J. Ohlemiller, R. D. Peacock, P. A. Reneke and J. R. Hall, "International Study on the Sublethal Effects of Fire Smoke on Survivability and Health: Phase I Final Report", NIST Technical Note, 1439 (2001).
4. E. A. Mason and B. Kronstadt, "Graham's Laws of Diffusion and Effusion", *Journal of Chemical Education*, Vol. 44, No. 12, p. 740 (1967).
 5. E. A. Mason and R. B. Evans III, "Graham's Laws: Simple Demonstrations of Gases in Motion: Part I, Theory", *Journal of Chemical Education*, Vol. 46, No. 6, p. 358 (1969).
 6. K. H. Sung, Y. S. Gong and S. G. Kim, "Gas Mask Removal Efficiency of CO, HCl, HCN, and SO₂ Gas Produced by Fire", *Korean Institute of Fire Science and Engineering*, pp. 57-60 (2015).
 7. S. S. Kim, N. W. Cho and D. H. Rie, "A Research for Assessment Fire Toxic Gas of Construction Material Using FT-IR and FED", *Fire Science and Engineering*, pp. 27-31 (2011).
 8. J. U. Sim and N. W. Cho, "Study on the Effect of Toxic Gas Filter Effect of Wet Towel during Fire", *Fire Science and Engineering*, pp. 52-56 (2018).
 9. K. T. Kim, "Influence of Hot Environment on Human Ventilatory and Cardiovascular Responses to Isocapnic Hypoxia at Rest", *Journal of The Korean Society of Living Environmental System*, pp. 800-805 (2010).
 10. D. A. Shelley, B. L. Sih and L. J. Ng, "An Integrated Physiology Model to Study Regional Lung Damage Effects and the Physiologic Response", *Theoretical Biology and Medical Modelling*, Vol. 11, No. 1, p. 32 (2014).
 11. Y. Tang, M. J. Turner and A. B. Baker, "Effects of Alveolar Dead-space, Shunt and V/Q Distribution on Respiratory Dead-space Measurements", *British Journal of Anaesthesia*, Vol. 95, No. 4, pp. 538-548 (2005).
 12. K. S. Shin and H. D. Ha, "The Effects of an Hand, Leg and Back Load \dot{V}_E Capacity", *Journal of Liberal Arts and Sciences Korea Maritime University*, Vol. 5 (1997).
 13. K. J. Lee, "Cardiopulmonary Survival for First Aid", *ROYAL AMC Animal Medical Center*, pp. 12-17 (2006).
 14. S. R. Lee, J. Y. Jeong, C. I. Kim and H. S. Ryou, "An Experimental Study of Smoke Movement in Tunnel Fires According to Ventilation Method", *Korean Journal of Air-Conditioning and Refrigeration Engineering*, pp. 691-699 (2002).