한국 A급, B급 1단위 화재 시험시 발생하는 일산화탄소 등의 정량적 연구

정인천 · 정영진^{*†}

Oklahoma State University (Fire and Emergency Management Administration), 한국소방산업기술원,

*강원대학교 소방방재공학과

A Study on Carbon Monoxide and Other Gases During the Fire Test (A-class:1st Rating & B-class:1st Rating)

Incheon Jeong · Yeong-Jin Chung^{*†}

Dept. of Fire and Emergency Management Administration, Oklahoma State University

*Dept. of Fire Protection Engineering, Kangwon National University

(Received October 6, 2013; Revised October 16, 2013; Accepted October 16, 2013)

요 약

한국기준 표준화된 A급 목재 및 B급 유류 화재 시험에서 룸코너시험기(RCT)를 사용하여 연소유독가스의 생성을 정량적으로 알아보고, 시험자들에게 미치는 인체유해성을 확인하였다. 그 결과 A급의 경우 유독가스가 시험자들에 직접적으로 노출되는 초기 3분 동안, 분당호흡량(RMV) 2단계에서 40% 카복시헤모글로빈(COHb)이 넘어가는 경우는 A급 9, 10단위에 해당하며, RMV 3단계에서 A급 5~10 단위까지가 모두 40% COHb을 초과함을 확인하였다. 한편 B급의 경우 유독가스가 시험자에게 직접 노출되는 초기 1분 동안은 A급에 비해 다소 안전하나 총 연소시간에는 RMV 3단계에서 B급 16~20 단위까지가 모두 20% COHb을 초과한 수치가 나옴을 확인하였다. 따라서 이 연구에서는 시험자들은 소화시험의 단위수를 고려하여 자급 호흡보조기나 그와 동일한 기능의 장치를 착용하는 규정을 제안한다.

ABSTRACT

This research is to identify how much toxic combustion gases are produced from Korea standardized real fire test (Class A&B) by using Room Corner Tester (RCT) and how much those gases are possibly dangerous to testing personnel by estimating the level of carboxyhemoglobin (% COHb). It is confirmed that testing personnel can be affected as more than 40% COHb from Class A 9th and 10th rating in respiration minute volume (RMV) 2 and from Class A 5th to Class A 10th rating in RMV 3 during the time for initial three minutes. Also, in the case of Class B real fire tests, although it is considered rather safe for the initial 1 minute, testing personnel can be affected as more than 20% COHb from Class B 16th to 20th rating in RMV 3 during total test time. Currently, the Korea standard is only focusing on the protection measures against the heat, but it is neglecting the protection measures against toxic combustion gases. Therefore, according to this study, it is strongly recommended that testing personnel should wear a self-contained breathing apparatus, or the equivalence depending on the real fire test rating.

Keywords : Real fire test, Fire safety, Room corner tester, Combustion toxic gases, Carbon monoxide

1. 서 론

화재에 의한 인적 피해는 1차로 열에 의한 화상중심의 피해가 있으며, 화재시 발생하는 유독가스에 의한 2차 피해가 있다. 화재에 의한 희생자 중에서 대략 75~80%는 직접적으로 화염에 의한 것이 아니라 연기, 유독가스, 혹은 산소 고갈에 의한 것이다⁽¹⁾. 화재시 발생하는 유독가스에 대한 연구는 그 대상 물질에 따라 매우 다양하게 이루어져 왔으며, 특히 일산화탄소는 특히 서서히 퍼지는 유독한 가

스로 인체내의 헤모글로빈과의 강한 결합성으로 작은 양으로도 매우 치명적이다⁽¹⁾. CO는 화재발생시에는 항상 존재하며 인간에게 노출시 정신상태의 혼란을 일으키고 의식을 잃게 만드는 치명적인 가스이다. 심할 경우에는 화재로 인한 CO가스 흡입으로 죽음에 이르게 하기도 한다. Ernst와 Zibrak⁽²⁾은 CO가 Carboxyhemoglobin (COHb)을 형성함으로써 Hypoxia(저산소증)를 일으키고 Oxyhemoglobin의 해리를 일으킨다고 하였다. 또한, Thom⁽³⁾은 CO의 Hemoglobin에 대한 친화도가 Oxygen (O₂)의 친화도에 비해서 200배

[†]Corresponding Author, E-Mail: yjchung@kangwon.ac.kr
TEL: +82-33-540-3121, FAX: +82-33-540-3129

이상이 더 높다고 제시하였다. 또한, 한 연구결과⁽⁴⁾에 의하면 “Hemoglobin의 CO에 대한 친화도는 매우 커서, COHb의 형태로 존재하는 Hemoglobin의 비율이 CO가 흡입됨에 따라서 점진적으로 계속 증가한다.”고 한다. 또한, Toxicology Update⁽⁵⁾에 의하면 1단계의 10~30% COHb 혈중 농도를 일으키는 CO에 대한 노출은 고동치는 일시적 두통, 숨가쁨 현상 및 현기증 등의 증상을 일으킨다. 2단계 중간정도의 30~50% COHb 혈중 농도는 심각한 두통, 나약함, 현기증, 메스꺼움, 구토, 실신, 심박 급속증 등의 증상을 야기한다. 마지막으로 심각한 3단계의 50~80% COHb 농도는 실신, 발작, 혼수상태, 심혈관 중독, 호흡실패 및 사망= 등의 더욱 심각한 증상을 발생시킨다. 한편 CO 값으로부터 체내의 % COHb를 계산하는 방법은 Corburn-Forster-Kane (CFK) 공식을 따른다⁽⁶⁾. 즉, CO의 농도와 % COHb의 관계에 대한 Equation 1 CFK 공식이 실험에 대한 데이터를 통해서 도출되어 있으며 다음과 같다. CO의 농도(ppm CO)와 사람의 활동에 따른 분당호흡량(RMV)과 노출시간(t)에 의해서 % COHb를 산출해낼 수 있다. 물론 CFK 공식에 대입하는 CO의 농도는 일정한 값을 전제로 하고 있기 때문에, CO 농도가 계속 변하는 화재에서는 흡입한 CO 총량에 % COHb가 영향을 받으므로 평균값으로 적용하면 된다. 사람의 분당호흡량 (RMV)은 사람의 활동 정도에 따라 3단계로 나뉘며 1단계(RMV 1)는 휴식을 취하거나 수면중인 상태로 8.5 L/min, 2단계(RMV 2)는 걷기 등의 가벼운 운동을 하는 단계로 25 L/min, 마지막 3단계(RMV 3)는 느린 달리기나 계단을 오르는 등의 비교적 힘든 운동을 하는 단계로 흡입유량은 50 L/min으로 가정한다.

$\% \text{COHb} = (3.317 \times 10^{-5}) (\text{ppm CO})^{1.036} (\text{RMV}) (t)$ Equation 1. the CFK equation (The Coburn-Forster-Kane equation)		
	ppm CO:	CO concentration (ppm)
	RMV:	Volume of air breathed (L/min) 1. Resting or sleeping: 8.5 L/min 2. Light work: 25 L/min 3. Heavy work: 50 L/min (slow running, walking upstairs)
	t:	Exposure time (min)

CO₂는 CO처럼 화재시 항상 발생하며, Purser⁽⁷⁾는 5% 이하의 CO₂가 CO만큼 유독하지는 아닐지라도 호흡을 자극해 호흡량을 증가시킨다고 하였다. 따라서 3% 정도의 CO₂는 RMV값을 두 배 정도로 상승시키고, 5% 정도의 CO₂는 RMV값이 세배가 된다. 즉 CO₂는 과호흡(hyperventilation)을 일으켜서 다른 유독한 CO 같은 생성물의 흡수를 촉진시키는 역할을 하는 것이다. 이에 대한 공식은 Equation 2로 주어진다.

$\text{RMV (L/min)} = \exp(0.2496 \times \% \text{CO}_2 + 1.9086)$ Equation 2. The relation between RMV and CO ₂		
	% CO:	CO concentration (%)
	RMV:	Ventilation (L/min)

한편, King의 연구⁽⁸⁾에 따르면, 대략 3~6%의 CO₂는 호흡장애의 정도가 점점 증가하고, 대략 5~6%의 CO₂는 호흡장애의 정도가 심각해지면서 두통과 구토를 수반하며 호흡실패 및 증상불편감 증세가 나타난다. 6% 정도의 CO₂에서 사람들은 20분 이상 견디기 힘들게 된다. 7~10%의 CO₂는 현기증, 졸립, 의식상실의 심각한 호흡상태에서 복합적으로 나타난다. CO₂ 농도가 10% 이상이 되면 의식상실이 더욱 급속하게 나타나며 사람들은 대략 2분 이내에 의식을 잃게 된다.

화재발생시 산소농도 저하에 노출로 인하여 사람들에게 저산소증을 일으키는데, Luft⁽⁹⁾의 사람을 대상으로 한 실험에 의하면 노출정도에 따라서 총 4가지의 단계로 나뉜다. 첫 번째 단계(indifferent phase)는 O₂ 농도 14.4~20.9% 사이에 존재하며, 15%의 농도에 근접하면 운동부하(exercise tolerance)의 초기단계의 증상이 나타나는 등의 경미한 영향이 발생한다. 두 번째 단계(compensated phase)는 O₂ 농도 11.8~14.4%로 심장박동의 약간의 증가, 정신운동에 영향, 단기기억상실증, 이성적 판단에 대한 영향 등의 다양한 증상을 수반한다. 세 번째 단계(manifest hypoxia phase)는 O₂ 농도 9.6~11.8%로 감각이 점점 무뎌지면서 좀 더 고차원의 프로세스의 정신단계 및 신경근 통제의 저하, 매우 중요한 판단능력 및 자유의지의 상실 등의 증상을 수반한다. 마지막으로 네 번째 단계(critical hypoxia phase)는 O₂ 농도 7.8~9.6%로 판단 및 이해능력의 붕괴로 인하여 의식불명의 상태로 진입하게 되며, 이어서 호흡이 중단되고 최종적으로 사망에 이르게 된다.

따라서 한국의 소화용품의 기술기준 중 소화기의 형식 승인 및 제품검사의 기술기준에 의거 표준화된 실화재시험을 통해 발생하는 유독가스에 대한 정량적 연구의 필요성이 제기된다. 그리고 화재 발생시 발생하는 유독가스에 대한 다양한 상황에서의 연구가 이루어져 왔지만, 국내의 표준화된 실화재시험시 시험자가 흡입할 수 있는 유독가스에 대한 기존 연구가 존재하지 않아 시험자의 인체 유해성에 대한 연구가 전무하여 이에 대한 새로운 연구가 필요하다. 본 연구에서는 한국 기준의 A급 1단위 실화재시험에서 발생하는 연소 유독가스를 ISO 9705 (Fire Tests: full-scale room test for surface products)에 의거 Room Corner Tester (RCT)를 사용하여 Gas Analyzer로 실시간으로 정량적 분석을 한다. 그리고 한국 기준의 B급 1단위 실화재시험에서 발생하는 연소 유독가스를 A급과 동일하게 실시간으로 정량적 분석을 한다. 또한 CFK 공식을 적용하여 발생 유독가스들의 농도를 모두 대입하여 시험자 체내

의 % COHb를 예측하여 인체유해성 여부를 알아보고자 한다.

2. 실험방법

2.1 한국기준 목재화재 A급 1단위, 유류화재 B급 1단위 시험 설계

「소화기의 형식승인 및 제품검사의 기술기준」⁽¹⁰⁾에 의한 A급 1단위 목재화재의 실화재 소화시험 모형은 Figure 1과 같으며, A급 1단위 소화시험에 사용하는 목재의 수분 함유율(10~15%) 이하인 소나무(Pine Tree)나 오리나무(Alder Tree)로 하며 규격은(30±3) mm × (35±3) mm × (730±3) mm이다. 연소대에는 1.5 L의 휘발유를 넣어 불을 붙인 후 3분 동안 연소후 소화를 시작한다. 소화는 무풍상태(풍속이 0.5 m/s 이하인 상태를 말한다)에서 실시한다. 소화약제의 방사가 완료된 때 잔염(불꽃을 알아볼 수 있는 상태를 말한다)이 없어야 하며, 방사완료 후 2분 이내에 다시 불타지 아니한 경우 그 모형은 완전히 소화된 것으로 본다. 소화기를 조작하는 자는 적합한 작업복(안전모, 내열성의 얼굴가리개, 장갑 등)을 착용 할 수 있다. 시험자는 화상 등의 위험이 없는 적당한 거리를 두고 소화하되 화재 모형에의 최접근 거리는 1m로 한다. 소화시험시의 환경온도는 그 장소의 대기 온도로 한다.

B급 1단위 유류화재의 실화재 소화시험 모형은 Figure 2와 같다. B급 1단위 소화시험에 사용하는 유류는 Gasoline으로 하며 그림과 같이 연소면적 0.2 m²로 하며 120 mm의 물위에 30 mm의 Gasoline을 넣는다. 즉, Water의 양은 24 L, Gasoline의 양은 6 L이다. B급 1단위 소화시험에 사용하는 유류는 Gasoline으로 하며 그림과 같이 연소면적 0.2 m²로 하며 120 mm의 물위에 30 mm의 Gasoline을 넣는다. 즉, Water의 양은 24 L, Gasoline의 양은 6 L이다. 소화는 모형에 불을 붙인 다음 1분 뒤에 시작한다. 소화는 무풍상태(풍속이 0.5 m/s 이하인 상태를 말한다)에서 실시한다. 방사완료 후 1분 이내에 다시 불타지 아니한 경우

Figure 2. Class B 1st rating model, gasoline.

그 모형은 완전히 소화된 것으로 본다. 소화기를 조작하는 자는 적합한 작업복(안전모, 내열성의 얼굴가리개, 장갑 등)을 착용 할 수 있다. 시험자는 화상 등의 위험이 없는 적당한 거리를 두고 소화하되 화재 모형에의 최접근 거리는 1m로 한다. 소화시험시의 환경온도는 그 장소의 대기 온도로 한다.

2.2 RCT 적용 A급 1단위, B급 1단위 화재시험시 발생유독가스의 정량적 분석

ISO 9705의 기준에 의해서 제작된 RCT 실험장치로 Figure 3에서 보듯이 Test Room, Hood, Measuring Tube, Gas Analysis Control Rack 등으로 구성되어 있다⁽¹¹⁾. 가스분석의 기본사양은 다음 Table 1과 같다. RCT 활용한 A급, B급 1단위 실화재 시험을 통한 유독가스 분석방법은 Figure 4, Figure 5와 같이 A급 혹은 B급 1단위 실화재 모형을 Test Room안에 위치시키고, 소화기의 형식승인 및 제품검사의 기술기준과 동일하게 A급은 연소대에는 1.5 L의 휘발유를 넣어 불을 붙이고 B급은 모형안에 Water 120 mm 깊이로 24 L, Gasoline 30 mm 깊이로 6 L를 부어 불을 붙인다. 그 후 강제소화를 시키지 않고 A급 혹은 B급 1단위 모형이 스스로 소화될 때까지 발생하는 가스에 대한 정량적 분석을 한다.

3. 실험결과 및 고찰

3.1 RCT의 정확성 및 정밀성에 대한 실험 및 이론적 검증

RCT의 정확성 검증을 위해서 A급 1단위 목재화재(Class A 1st rating, Pine Tree)에 대한 검증결과를 Figure 6에서 보여주고 있다. 세부적으로 보면, 첫 번째 Walton⁽¹²⁾의 Heat Release Rate를 구하는 Equation에 의한 이론값(HRR: Theoretical Value by Fire Protection Engineering)은 Equation 3에 의해서 구해지며 계산에 필요한 국내 A class pitch pine wood에 대한 Δh_c 는 Chung과 Spearpoint의 연구⁽¹³⁾에서 측정한 값인 12.26 MJ/kg을 사용하였다. 두 번째, RCT에 의한 실험값(HRR: Experimental Value by RCT)은 분석결과 시험기기에서 자체적으로 산출된다. 또한 세 번째, Babracuskas and Grayson⁽¹⁴⁾에 의해 제시된

Figure 1. Class A 1st rating model, pine tree, general arrangement of wood crib.

Figure 3. Schematic of room corner tester and gas sampling schematic.

Table 1. Gas Analyzer in RCT

Gas	Type	Detection Range	Response Time	Noise & Drift
O ₂	Paramagnetic	(0~21)%	≤12 s	≤100 ppm within 30 mins
CO ₂	Infrared	(0~10)%	≤12 s	≤100 ppm within 30 mins
CO	Infrared	(0~1)%	≤12 s	≤100 ppm within 30 mins

Figure 4. Class A 1st rating in RCT.

Figure 5. Class B 1st rating in RCT.

Figure 6. HRR (heat release rate, KJ/s) verification in case of class A 1st rating.

방법을 통해 실험시 측정된 Equation 4에 의한다. 이것은 실험시 측정된 O_2 값은 만을 이용하여 Oxygen Consumption Calorimetry에 의해 산출한 실험값(HRR: Experimental Value by measured O_2)이다. 결론적으로, 이 세 가지의 HRR 값이 Figure 7에서와 같이 정확도 및 정밀도 면에서 거의 일치함을 확인함으로써 RCT에 대한 검증이 이루어진다.

HRR= $\Delta h_c \times MLR$		
Equation 3. Heat Release Rates (HRR)		
	Δh_c :	The effective heat of combustion (kJ/kg)
		A Class (Pitch pine): 12.26 MJ/kg
		B Class (Gasoline): 43.7 MJ/kg
	MLR:	The mass loss rate (kg/s)

$\dot{q} = E \frac{\Phi}{1 + \Phi(\alpha - 1)} \dot{m}_e \frac{M_{O_2}}{M_a} (1 - X_{H_2O}^0 - X_{CO_2}^0) X_{O_2}^{A^0}$		
Equation 4. Heat Release Rates (HRR) if only O ₂ is measured: Oxygen Consumption Calorimetry"		
E:	13.1 MJ/kg (the amount of energy released by complete combustion per unit mass of oxygen consumed)	
Φ:	The Oxygen depletion factor $\Phi = \frac{(X_{O_2}^{A^0} - X_{O_2}^A)}{(1 - X_{O_2}^A) X_{O_2}^{A^0}}$ X _{O₂} ^Z : the mole fraction of O ₂ in the oxygen analyzer during the test	
α:	1.105, which is recommended average value	
$\dot{m}_e$:	Mass flow rate in the duct (kg/s) $\left(\dot{m}_e = 26.54 \frac{A k_c}{f(Re) \sqrt{T_e}} \sqrt{\Delta P} \right)$ f(Re) : 1.08 (in many full scale fire test, Re > 3800) A: Cross-sectional area of the duct (m ²) k _c : Velocity profile shape factor	
M _{O₂} :	Molecular weight of O ₂ (≈32 kg/mol)	
M _a :	Molecular weight of incoming air (kg/mol) (M _a = M _{dry} (1 - X _{H₂O} ⁰) + M _{H₂O} X _{H₂O} ⁰) M _{dry} : molecular weight of dry air (≈29 kg/mol) M _{H₂O} : molecular weight of H ₂ O (≈18 kg/mol)	
X _{H₂O} ⁰ :	Mole fraction of H ₂ O in the incoming air $X_{H_2O}^0 = \frac{RH P_s(T_a)}{100 P_a}$ RH: Relative humidity (%) P _s (T _a): Saturation pressure of water vapor at T _a (Pa) T _a : Air temperature (K) P _a : Air pressure (Pa)	
X _{CO₂} ⁰ :	Mole fraction of CO ₂ in the incoming air, Approximately constant and negligible (≈330 ppm)	
X _{O₂} ^{A⁰} :	Measured mole fraction of O ₂ in the incoming air	
	$X_{O_2}^{A^0} = \frac{\frac{\dot{m}_{O_2}^0}{M_{O_2}}}{\frac{\dot{m}_{O_2}^0}{M_{O_2}} + \frac{\dot{m}_{N_2}^0}{M_{N_2}}}$	$\dot{m}_{O_2}^0$: mass flow of O ₂ in the incoming air (kg/s) $\dot{m}_{N_2}^0$: mass flow of N ₂ in the incoming air (kg/s) M _{N₂} : molecular weight of N ₂ (28 kg/kmol)

3.2 A급 목재화재시 발생 연소유독가스 정량분석결과

A급 1단위 목재화재에 점화하여 불이 꺼질 때의 Figure 7, 8과 같이 다양한 연소유독가스들이 생성되었다. 발생되는 다양한 유독가스들 중에서 이 연구에서는 CO, CO₂, O₂을 중심으로 살펴보았다. 그 이유는 첫째로 Kimmerle의 연구⁽¹⁵⁾에 따르면 15% 미만의 O₂ 농도는 사람들에 치명적인 영향을 미칠 수 있기 때문이며, 두 번째로 매우 높은 농도의 CO₂, 한편 낮은 농도 CO일지라도 사람에게 질식(asphyxiant effect)시킬 수 있기 때문이다.

A급 목재화재 1단위의 시험결과를 화재의 성장단계에 따라 세 가지로 나누면 Table 2와 같이, 첫 번째 단계는

“Nonflaming thermal decomposition/smoldering fires”, 두 번째 단계는 “Early/developing flaming fires”, 마지막 세 번째 단계는 “Small Oxygen vitiated flaming fires & Fully developed or postflashover fires”을 나눌 수 있다.

첫 번째 단계에서는, 400~700 °C 사이에서 Nonflaming 열분해(Smoldering fire)는 불완전한 연소 및 산화(Incompleted combustion & oxidation)가 되어 CO와 같은 많은 양의 질식성 물질(asphyxiants)과 자극성 물질(irritants)이 발생된다. CO의 생성량이 매우 많고 CO₂/CO 비율이 7이하로 작으며 일정한 값으로 수렴한다. 즉, 점화 초기 및 간헐적인 화염발생시 연소형태가 불완전한 형태로 많은 유독성

Figure 7. Class A 1st rating real-fire test.

Figure 8. The production of CO_2 , CO and O_2 .

물질이 생성된다. 단 A급 1단위 실화재 시험에서는 모형 하단에 연소대에 Gasoline 1.5 L가 연소되면서 연소대 상단의 Pine wood crib에 불이 붙기 때문에, 목재에 불이 붙는 불완전 연소 및 산화 과정에서 많은 양의 CO가 발생함을 알 수 있다. 두 번째 단계에서는, 일단 화염(flaming)이 발생하면 고온의 산소공급이 매우 잘된 Early flaming fire가 일어나며, 완전연소가 일어나 인체에 무해한 CO_2 와 H_2O 가 대부분 발생하게 된다. 질식성 물질(asphyxiants) 및 자극성 물질(irritants)의 생성량 및 CO 발생량은 첫 번째 단계에 비해 더 낮다. 70~100 s 구간에서는 불완전연소에서 효율이 좋은 완전연소형태로 넘어가면서 CO 농도는 1740 ppm에서 1290 ppm으로 감소하고 CO_2 농도 1.363%에서 1.997%로 증가하게 된다. 그에 따라 CO_2/CO 비율 또한 5.81에서 15.1로 증가한다. 하지만 순간 연소속도가 급속히 빨라지면서 130 s에 HRR이 대략 1180 kJ/s로 최대가 되며, CO는 다시 1650 ppm으로 상승하고, CO_2 농도 또한 대략 2.0%의 높은 값을 가진다. 이후 600 s까지는 연소효율이 높아지고 완전연소형태로 유지되면서 CO 농도는 꾸준히 하락하여 600 s 경에는 100 ppm까지 하락하고, CO_2 농도는 1.2~2.0% 사이의 높은 값을 꾸준히 유지한다. 그에 따라 CO_2/CO 비율 높아져서 600 s 경에는 대략 120 정도까지 상승한다. 마지막 세 번째 단계에서는, 600 s 이후로 상승하기는 하지만 산소농도가 19.5~20.5% 정도로 낮으며, 800 °C 이상에서 매우 고온의 postflashover와 손상

된 화염(vitiated flaming) 연소 조건에서는 열분해생성물들이 저분자량의 물질들로 쪼개져서 다시 CO 농도가 100 ppm에서 400 ppm까지 상승하게 되며 CO_2 농도 1.2%에서 0.2%까지 감소하게 된다. 그에 따라 CO_2/CO 비율이 계속 감소하여 20 이하가 된다.

발생가스 분석결과 O_2 농도는 15%보다 낮은 구간이 전혀 존재하지 않으므로 그로 인한 위험성은 배제할 수 있다. 또한, 발생하는 CO의 위험도는 발생하는 CO의 농도를 토대로 Equation 1을 통해서 % COHb를 통해서 정량적으로 구할 수 있다. 한국기준 A급 소화시험 기준에 따르면 연소대의 휘발유에 불을 붙인 후 3분 동안 연소후 소화를 시작한다고 되어 있으므로 A급 실화재 시험에서의 시험자에 인체유해성을 정량적으로 구하려면 항상 직접적으로 발생하는 유독가스에 노출되는 초반 3분 동안이 매우 중요함을 알 수 있다.

CO_2 존재하 과호흡을 반영한 새로운 RMV 2 값을 구하기 위해 우선 Figure 8의 3분 동안의 CO_2 발생 그래프의 적분값(221.1825)을 토대로 평균값을 구하면 1.229%가 나오고 시험자의 새로운 흡입유량 RMV 값을 나누어 multiplication factor값을 구하면 1.341이 나오고 새로운 RMV 2단계의 흡입유량은 33.52 L/min이 된다. 이를 적용하면 최종적으로 % COHb 값은 Table 3과 같이 4.19%가 나온다. 마찬가지로 A급 10단위 까지 확장하여 % COHb는 44.87%가 나오고 Table 3과 같은 결과값을 구할 수 있

Table 2. Three Types of Fires in Terms of Class A 1st Rating

The Stage & Fire	CO ₂ /CO	The Production Curve of CO, CO ₂
1st step (0~70 s)	<7.0
Nonflaming thermal decomposition/ smoldering fires		
2nd step (70~600 s)	6~120
Early/developing flaming fires		
3rd step (600 s~)	<20
Small Oxygen vitiated flaming fires & Fully developed or postflashover fires		

다. 또한, Table 3의 계산결과를 실화재시험시 항상 시험자는 소화시험 모형을 만드는 등 많은 작업을 함으로 시험자의 흡입유량을 느린 달리기나 계단을 오르는 등의 비교적 힘든 운동을 하는 RMV 3단계로 새롭게 적용하면 RMV 3의 값은 33.52 L/min에서 67.05 L/min으로 상승하게 되고 새로운 % COHb는 Table 4과 같이 주어지게 된다.

A급 1단위 목재화재로 인한 유독가스 분석을 통해 시험자의 혈중 % COHb를 예측하여 인체유해성을 정량적으로 알아본 결과는 Table 4과 같다. 심각한 3단계(>50%) % COHb가 예측되는 A급 소화시험 단위는 6단위에서 10단위까지가 해당이 된다. 중간의 2단계(30~50%) % COHb가 예측되는 단위는 4단위와 5단위 A급 소화시험이 해당

Table 3. Test Results for Initial 3 Minutes of % COHb with a RMV 2 under Influence of CO₂

Test Rating	Relative Mass	Calculated % COHb	Measured or Calculated Average Values of CO Concentration (ppm)	RMV 2 with CO ₂ (L/min)	Measured Time (min)
Class A 1st	1.00	4.19	980.08	33.52	3
Class A 2nd	1.97	8.47	1933.32	33.52	3
Class A 3rd	2.97	12.95	2913.40	33.52	3
Class A 4th	3.95	17.37	3866.63	33.52	3
Class A 5th	4.95	21.95	4846.71	33.52	3
Class A 6th	5.92	26.43	5799.95	33.52	3
Class A 7th	6.92	31.07	6780.03	33.52	3
Class A 8th	7.89	35.61	7733.26	33.52	3
Class A 9th	8.89	40.30	8713.34	33.52	3
Class A 10th	9.86	44.87	9666.58	33.52	3

Table 4. Test Results for Initial 3 Minutes of % COHb with a RMV 3 under Influence of CO₂

Test Rating	Relative Mass	Calculated % COHb	Measured or Calculated Average Values of CO Concentration (ppm)	RMV 3 with CO ₂ (L/min)	Measured Time (min)
Class A 1st	1.00	8.38	980.08	67.05	3
Class A 2nd	1.97	16.94	1933.32	67.05	3
Class A 3rd	2.97	25.90	2913.40	67.05	3
Class A 4th	3.95	34.73	3866.63	67.05	3
Class A 5th	4.95	43.89	4846.71	67.05	3
Class A 6th	5.92	52.86	5799.95	67.05	3
Class A 7th	6.92	62.15	6780.03	67.05	3
Class A 8th	7.89	71.22	7733.26	67.05	3
Class A 9th	8.89	80.59	8713.34	67.05	3
Class A 10th	9.86	89.74	9666.58	67.05	3

된다. 마지막 1단계(10~30%) % COHb가 예측되는 단위는 2단위와 3단위이다. A급 목재화재 6단위~10단위는 % COHb 농도가 심각한 3단계에 해당하며, Toxicology update⁽⁵⁾에 의하면, 시험자가 실신, 발작, 혼수상태, 심혈관 독성증상, 호흡실패, 그리고 사망에도 이를 수 있다고 한다. 그리고 A급 목재화재 4단위, 5단위는 CFK 공식에 의한 예측 % COHb 농도가 30~50% 사이에 존재하는 중간의 3단계에 속하며, 심한 두통, 나약함, 현기증, 메스꺼움, 구토, 실신 및 심박 급속증 등의 증상이 나타나게 된다. 마지막으로 가장 경미한 단계인 1단계에는 A급 2단위와 3단위가 해당하며 시험자에게 나타날 수 있는 증상에는 가볍고 일시적인 두통, 숨이 찬 증상, 자극 과민성 증상, 그릇된 판단력, 불완전한 기억력 및 급성피로 증상 등이 있다.

한국기준 목재화재 A급 시험에 의하면, “시험자는 장갑, 마스크, 안전헬멧, 모자 및 보안경의 착용을 방화복의 착용으로 보지 아니한다.”라고 명시되어 있다. 하지만, 성능을 측정하는 부분에만 초점이 맞추어져 있을 뿐, 화재시험시 발생하는 유독가스에 그대로 노출되는 시험자를 보호

하는 그 어떤 보호장비도 포함되어 있지 않다. 한편, 미국 화재시험 기준인 UL 711⁽¹⁶⁾에 의하면 시험자는 우선 화재 시험시 발생하는 열에 의해서는 내열성얼굴가리개가 있는 헬멧, 내열성 코트와 장갑을 착용함으로써 보호받아야 하며, 발생하는 유독성 가스에 의해서는 자급 호흡보조기(self-contained breathing apparatus)나 혹은 그와 동일한 기능의 장치에 의해 보호받는 것이 권고되고 있다. 따라서 한국의 표준화된 A급 목재 실험화재시험으로부터 정량적으로 열만큼의 유독성 가스 물질이 발생되는지 확인되었고, 그 물질들로 인하여 야기되는 높아지는 혈중 % COHb로 인하여 시험자의 인체에 잠재적으로 얼마나 유해할 수 있는지를 정량적으로 알 수 있었다. 따라서 이 모든 시험결과와 분석결과를 토대로 한국의 A급 소화시험의 수행에 있어서 시험자들은 그들이 수행하는 A급 소화시험의 단위수를 고려하여 자급 호흡보조기나 혹은 그와 동일한 기능의 장치를 착용하는 것을 제안한다. 특히, A급 6단위 이상의 소화시험에서는 심각한 3단계(>50%) % COHb가 예측되는 시험이므로 시험자가 자급 호흡보조기나 혹은 그와

Figure 9. Class B 1st rating real-fire test.

Figure 10. The production of CO₂, CO and O₂.

동일한 기능의 장치를 착용하는 것을 의무화하는 규정이 필요하다. A급 소화시험의 수행에 있어서 소화시험의 성능을 평가하는 것도 물론 중요하지만, 그 성능시험을 수행하는 시험자의 안전 또한 중요하기 때문이다.

3.3 B급 유류화재시 발생 연소유독가스 정량분석결과

B급 1단위 유류화재에 점화하여 불이 꺼질 때의 Figure 9, 10과 같이 다양한 연소유독가스들이 생성된다. A급 목재화재와 마찬가지로 발생하는 다양한 유독가스들 중에서 이 연구에서는 CO, CO₂, O₂를 중심으로 살펴보았다.

첫 번째, 우선, Figure 10에 의하면, O₂의 농도는 사람에게 치명적일 수 있는 수준인 15%보다는 훨씬 높으므로 그로 인한 위험성은 배제할 수 있다. 두 번째로, A급 실화재 시험과 마찬가지로, B급 1단위 실화재 시험으로부터 최고 단위인 20단위까지 발생하는 CO의 위험도는 발생하는 CO의 농도를 토대로 CFK 공식(Equation 1)을 통해서 % COHb를 통해서 정량적으로 구할 수 있다. CO₂ 존재하에서는, CO₂ 자체의 유독성보다는 호흡을 자극하여 과호흡을 일으키는 요인을 반영한 새로운 RMV 값이 Equation 2로 주어진다. B급 1단위 유류화재의 결과인 Figure 10의 13분 동안의 CO₂ 발생 그래프의 적분값(197.04)을 토대로 평균 값을 구하면 0.2546%가 나오고 시험자의 새로운 흡입유량 RMV 값이 7.147으로 계산된다. 따라서 이 값을 토대로 background에서의 6.8 L/min의 값을 나누어 multiplication

factor값을 구하면 1.051이 나오고 새로운 RMV 2단계의 흡입유량은 26.27 L/min으로 구해진다. 이를 적용하면 최종적으로 % COHb값은 Table 5과 같이 0.58%가 나온다. 마찬가지로 B급 20단위 까지 확장하여 계산해보면 최고 Table 5과 같은 결과값을 구할 수 있다. 또한, Table 5의 계산결과를 A급 결과 분석과 동일한 방식으로, 실화재 시험시 항상 시험자는 소화시험 모형을 만드는 등 많은 작업을 함으로 시험자의 흡입유량을 느린 달리기나 계단을 오르는 등의 비교적 힘든 운동을 하는 RMV 3단계로 새롭게 적용하면 RMV 3 값은 26.27 L/min에서 52.55 L/min으로 상승하게 되고 새로운 % COHb는 Table 6과 같이 주어지게 된다.

한국의 B급 1단위 실화재시험 기준에 의하면 모형에 Gasoline을 넣어 불을 붙인 후 1분 동안 연소 후 소화를 시작한다. 따라서 발생하는 유독가스는 시험자에게 실제 소화를 시작하기 전에 대기하는 시간은 A급 실화재시험의 3분 보다 짧은 1분 동안만 직접적으로 노출된다. 하지만 Figure 11에 의하면, B급 1단위 실화재시험에서 초기 1분 동안 CO가 거의 발생하지 않음을 확인할 수 있다. 그러므로 비록 시험자가 유독가스 발생에 대한 적절한 보호장치 없이 직접적으로 1분 동안 노출된다고 할 지라도 A급 실화재시험에서 만큼 위험하지는 않음을 알 수 있다. 한편, 총 13분 동안 모두 연소될 때까지의 발생 연소유독가스에 의한 위험도를 살펴본다고 할지라도, Table 6에서 심각한

Table 5. Test Results of % COHb with a RMV 2 under Influence of CO₂

Test Rating	Relative Mass	Calculated % COHb	Measured or Calculated Average Values of CO Concentration (ppm)	RMV 2 (L/min)	Measured Time (min)
Class B 1st	1	0.58	45	26.27	13
Class B 2nd	2	1.20	90	26.27	13
Class B 3rd	3	1.82	135	26.27	13
Class B 4th	4	2.46	180	26.27	13
Class B 5th	5	3.10	225	26.27	13
Class B 6th	6	3.74	270	26.27	13
Class B 7th	7	4.39	315	26.27	13
Class B 8th	8	5.04	360	26.27	13
Class B 9th	9	5.70	405	26.27	13
Class B 10th	10	6.35	450	26.27	13
Class B 11th	11	7.01	495	26.27	13
Class B 12th	12	7.67	540	26.27	13
Class B 13th	13	8.34	585	26.27	13
Class B 14th	14	9.00	630	26.27	13
Class B 15th	15	9.67	675	26.27	13
Class B 16th	16	10.34	720	26.27	13
Class B 17th	17	11.01	765	26.27	13
Class B 18th	18	11.68	810	26.27	13
Class B 19th	19	12.35	855	26.27	13
Class B 20th	20	13.03	900	26.27	13

Table 6. Test Results of % COHb with a RMV 3 under Influence of CO₂

Test Rating	Relative Mass	Calculated % COHb	Measured or Calculated Average Values of CO Concentration (ppm)	RMV 3 (L/min)	Measured Time (min)
Class B 1st	1	1.17	45	52.55	13
Class B 2nd	2	2.40	90	52.55	13
Class B 3rd	3	3.65	135	52.55	13
Class B 4th	4	4.92	180	52.55	13
Class B 5th	5	6.20	225	52.55	13
Class B 6th	6	7.48	270	52.55	13
Class B 7th	7	8.78	315	52.55	13
Class B 8th	8	10.08	360	52.55	13
Class B 9th	9	11.39	405	52.55	13
Class B 10th	10	12.71	450	52.55	13
Class B 11th	11	14.02	495	52.55	13
Class B 12th	12	15.35	540	52.55	13
Class B 13th	13	16.67	585	52.55	13
Class B 14th	14	18.00	630	52.55	13
Class B 15th	15	19.34	675	52.55	13
Class B 16th	16	20.68	720	52.55	13
Class B 17th	17	22.02	765	52.55	13
Class B 18th	18	23.36	810	52.55	13
Class B 19th	19	24.70	855	52.55	13
Class B 20th	20	26.05	900	52.55	13

3단계(>50%) 및 중간의 2단계(30~50%) % COHb가 예측되는 B급 실화재 시험 단위는 존재하지 않는다. 하지만, 마지막 가장 경미한 1단계(10~30%)는 B급 8단위에서 20단위 시험에까지 해당되며, 시험자에게 나타날 수 있는 증상에는 가볍고 일시적인 두통, 숨이 찬 증상, 자극 과민성 증상, 그릇된 판단력, 불안정한 기억력 및 급성피로 증상 등이 있다. 정량적 분석결과에 의하면 A급 실화재시험에 비하면 B급 소화시험의 수행에 있어서 시험자들은 상대적으로 더욱 인체유해성이 덜하지만, B급 소화시험도 마찬가지로 단위수를 고려하여 자급 호흡보조기나 혹은 그와 동일한 기능의 장치를 착용하는 것을 제안한다.

4. 결 론

이 연구에서는 한국기준의 표준화된 A급 목재 및 B급 유류화재 시험에서 룸코너시험기를 사용하여 정량적으로 얼마나 많은 연소유독가스가 생성되는 지를 알아보고, 그 생성된 가스들이 시험자들에게 미치는 인체유해성이 정량적으로 분석해 보았다.

1) A급 1단위 목재 실화재시험에서의 연소유독물질 분석결과 연소 초기 3분간(A급 화재시험에서 시험자에게 직접적으로 노출되는 시간)에는 목재의 불완전연소가 우세함으로 CO의 평균농도(980.08 ppm), CO₂의 평균농도(1.229%)로 CFK 공식 적용시 잠재적으로 발생할 수 있는 시험자의 체내 혈중 % COHb 2단계(RMV 2: 걷기 등의 가벼운 운동을 하는 단계)에서 4.19%, 3단계(RMV 3: 느린 달리기나 계단을 오르는 등의 비교적 힘든 운동을 하는 단계)에서 8.38%가 예측된다. 목재의 양을 상대적 비교를 통해서 % COHb를 예측해보면 RMV 2단계에서 40% 이상의 % COHb가 A급 9단위(40.30%), 10단위(44.87%)로 나오고, RMV 3단계에서는 A급 5단위(43.89%)에서 10단위(89.74%)까지 총 6개의 규모의 단위에서 40%의 COHb를 초과하였다.

2) B급 1단위 유류 실화재시험에서의 연소유독물질 분석결과 연소 초기 1분간(B급 화재시험에서 시험자에게 직접적으로 노출되는 시간)에는 gasoline의 완전연소가 우세하여 CO가 거의 발생하지 않았다. 비록 초기 1분간은 다소 시험자에게 안전하다고 판단되지만, B급 1단위 실화재 시험에서 총 13분 동안 모두 연소될 때까지의 발생 연소유독가스에 의한 유해성을 예측해보면 RMV 2단계에서 B급 20단위(12.39%)이고 RMV 3단계에서 B급 16단위(20.68%)에서 20단위(26.05%)가 20% COHb를 초과하였다.

3) 한국 기준(2012) 「소화기의 형식승인 및 제품검사의 기술기준」⁽¹²⁾에 의한 A급 그리고 B급 실화재 시험에서는, “시험자는 장갑, 마스크, 안전헬멧, 모자 및 보안경의 착용을 방화복의 착용으로 보지 아니한다.”라고 명시되어 있다. 이 기준은 실화재시험시 열에 대한 보호장비는 포함되어

있으나 발생하는 연소유독가스에 대한 보호장비는 전혀 포함되어 있지 않다. 비록 사람의 건강 상태에 따라서 다소 차이가 발생하기는 하지만, 50% 이상의 COHb에서는 실신, 발작, 혼수상태, 심혈관 독성증상, 호흡실패, 그리고 사망에도 이를 수 있다고 한다. 따라서 실화재시험의 수행에 있어서 소화시험의 성능을 평가하는 것도 물론 중요하지만, 시험자의 안전 또한 중요하므로 이 연구결과를 토대로 소화시험의 단위수를 고려하여 자급 호흡보조기나 혹은 그와 동일한 기능의 장치를 착용하는 것을 제안한다.

후 기

끊임없는 학문의 깊이로 따뜻하게 지도해주신 Oklahoma State Univeristy의 Tony Brown 교수님과 Seongwon, Yun 교수님께 감사드립니다. 또한, 이 연구 시험 수행에 있어서 많은 협조와 도움을 주신 한국소방산업기술원(Korea Fire Institute of Industry & Technology)의 이하영, 전은주, 유우준 연구원님께 감사드립니다.

References

1. R. H. White and M. A. Dietenberger, “Wood Handbook: Wood as an Engineering Material”, Ch.17: Fire Safety (1999).
2. A. Ernst and J. D. Zibrak, “Carbon Monoxide Poisoning”, N. Engl. J. Med., Vol. 339, No. 22, pp. 1603-1608 (1998).
3. S. R. Thom, “Carbon Monoxide Pathophysiology and Treatment”, Physiology and Medicine of Hyperbaric Oxygen Therapy. Philadelphia: Saunders Elsevier, pp. 321-347 (2008).
4. C. L. Beyler, “SFPE Handbook of Fire Protection Engineering”, Section2, pp. 114-115. Quincy Massachusetts: National Fire Protection Association (2008).
5. John Wiley & Sons, Ltd. “Toxicology Update”, Journal of Applied Toxicology, Vol. 19, No. 5, pp. 379-386. (1999).
6. R. D. Stewart, J. E. Peterson, E. D. Baretta, H. C. Dodd and A. A. Herrmann, “Experimental Human Exposure to High Concentrations of Carbon Monoxide”, Archives of Environmental Health, John Wiley & Sons, Ltd. Vol. 26, No. 1, pp. 1-7 (1973).
7. D. A. Purser, “A Bioassay Model Fortesting the Incapacitating Effects of Exposure to Combustion Product Atmospheres Using Cynomolgus Monkeys”, Journal of Fire Sciences, Vol. 2, No. 1, pp. 20-26 (1984).
8. B. G. King, “High Concentration-short Time Exposures and Toxicity”, Journal of Industrial Hygiene and Toxicology, Vol. 31, No. 6, pp. 365-375 (1949).
9. U. C. Luft, “Aviation Physiology: the Effects of Altitude

- in Handbook of Physiology", American Physiology Society. Washington, DC, pp. 1099-1145 (1965).
10. NEMA (National Emergency Management Agency, Republic of Korea), "Standards of Model Approval and Inspection Technology for Fire-extinguishers" (2012).
 11. KFI (Korea Fire Institute of Industry & Technology, Republic of Korea), "User's Guide for the Room Corner Tester" (2008).
 12. W. D. Walton, "SFPE Handbook of Fire Protection Engineering", Section 3, Quincy Massachusetts: National Fire Protection Association (2008).
 13. Y. J. Chung and M. Spearpoint, "Combustion Properties of Native Korean Wood Species", International Journal on Engineering Performance-Based Fire Codes, Vol. 9, No. 3, pp. 118-125 (2008).
 14. V. Babrauskas and S. J. Grayson, "Heat Release in Fires. Ch.3: Oxygen Consumption Calorimetry", London, Glasgow, Weinheim, NewYork, Tokyo, Melbourne, Madras: An Imprint of Chapman & Hall (1990).
 15. G. Kimmerle, "Aspects and Methodology for the Evaluation of Toxicological Parameters During Fire Exposure", Journal of Combustion Toxicology, Vol. 1 (1973).
 16. Underwriters Laboratories Inc. "UL 711, Rating and Fire Testing of Fire Extinguishers: Standard for Safety", U.S.A. (2009).