

Evaluation of the combustion chamber for burning candle and measuring the emission factor of its' combustion products

Hyung-Jin Lim and Man-Goo Kim[★]

Department of Environment, Kangwon National University, 193-1, Hyoja-dong,
Chunchon-shi, Kangwon-do 200-701, Korea

(Received March 26, 2015; Revised June 10, 2015; Accepted June 16, 2015)

양초 연소 시 발생하는 오염물질 방출계수 측정을 위한 연소실 제작과 평가

임형진 · 김만구[★]

강원대학교 환경학과

(2015. 3. 26. 접수, 2015. 6. 10. 수정, 2015. 6. 16. 승인)

Abstract: Recently, candles have been widely used to create a romantic atmosphere and to heat tea. In this study, a small combustion chamber for candle was designed using an 0.008 m³ bell jar. The emission factors of combustion products were then measured. The combustion chamber includes a glass dish, which prevents candle flame from affecting the composition of the gas emitted through the exhaust outlet. The outlet in the combustion chamber was designed as a cone shape, and it was lengthened to prevent flow from the outside, which could affect the homogeneous composition of the exhaust gas. The temperature at the outlet of the chamber was 34 °C~41 °C. The major combustion products of the candle, such as such aldehydes and acids, contained oxygen. The mass specific emission rates of benzene, toluene, ethylbenzene, and TVOC were 0.04 µg/g, 0.01 µg/g, 0.02 µg/g, and 3.81, respectively. The mass specific emission rates of formaldehyde, acetaldehyde and benzaldehyde were 4.48 µg/g, 1.09 µg/g, and 0.67 µg/g, respectively. Considering the different compositions of the candle samples, their mass specific emission rates were similar to those obtained by using a large chamber 0.17 m³~50 m³ in size.

요 약: 최근 실내 분위기 환경조성이나 차 등의 가열용으로 실내에서 양초가 많이 사용되고 있다. 이 연구에서는 0.008 m³ 벨자를 이용하여 소형 연소실을 제작하고, 양초 연소 생성물들의 방출계수를 측정하였다. 연소실 내부에 유리 접시를 양초 위에 설치하여 불꽃의 직접적인 영향을 배제하고 배출구의 높이를 높이고 깔때기 모양으로 하여 배출구로 유입되는 외기를 차단하여 균질한 조성의 배출가스를 얻을 수 있었다. 연소실 배출가스의 온도는 34 °C~41 °C의 범위였다. 양초 연소 시 발생하는 연소생성물은 주로 알데하이드류나 산류등 함 산소화합물들이었다. 양초 연소생성물의 질량단위방출계수는 벤젠, 톨루엔, 에틸벤젠이 각각 0.04 µg/g, 0.01 µg/g, 0.02 µg/g 이었으며, 총휘발성 유기 화합물의 방출계수는

[★] Corresponding author

Phone : +82-(0)33-250-8576 Fax : +82-(0)33-251-3991

E-mail : mgkim@kangwon.ac.kr

This is an open access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

3.81 $\mu\text{g/g}$ 으로 나타났다. 알데하이드류의 방출계수는 폼알데하이드, 아세트알데하이드 및 벤즈알데하이드가 각각 4.48 $\mu\text{g/g}$, 1.09 $\mu\text{g/g}$, 0.67 $\mu\text{g/g}$ 으로 VOC 류 보다 높은 방출계수를 나타냈다. 실험에서 사용된 양초 시료의 성분의 차이점을 고려하면 이 연구에서 사용한 0.008 m^3 연소실을 이용하여 얻은 연소생성물들의 질량단위 방출계수와 기존의 0.17 $\text{m}^3\sim 50 \text{m}^3$ 연소실을 이용해 측정된 결과들과 매우 유사하였다.

Key words: candle, combustion chamber, emission factor, volatile organic compound, aldehyde

1. 서 론

실내 공간 내에서 난방 조리 등의 연소 조작 이외에도 최근 쾌적한 실내 환경조성이나 부드러운 분위기를 연출하기 위한 양초 제품들이 많이 사용되고 있다. 양초는 과거 단순히 어둠을 밝히는 용도에서 관상용, 방향제 및 아로마 테라피나 차 등의 가열용으로도 널리 보급되어 사용되고 있다. 양초의 주원료는 석유의 정제과정의 부산물인 파라핀계 왁스로 연소생성물에 대한 관심이 적었다. 그러나 다양한 첨가물이 함유된 양초들의 연소생성물에 관해서는 연구의 중요성이 대두되고 있다.

이제까지 실내 연소 활동 중에서 발생하는 연소생성물에 관한 논문은 실내 흡연이나^{1,2} 불을 이용한 요리 과정 중^{3,4} 발생하는 물질이나 실내 공기 질 변화에 집중되어 있다.

양초의 연소 중 방출되는 물질에 관하여서는 입상물질,^{5,6} 휘발성유기화합물(VOCs),^{7,9} 다환방향족화합물(PAHs)¹⁰들에 대한 연구들이 있다. 유럽연합에서 양초에 관한 규격으로는 화재 안정성¹¹이나, 연소 시 발생하는 그을음¹²에 관해 기준을 마련하여 규제하고 있다. 유럽연합표준기구(CEN)에서는 양초 연소의 기술위원회를 구성하여 관련 오염물질들의 방출에 관한 표준규격들을 마련하고 있다. 우리나라에서는 아직 양초 실내 연소 시 발생하는 연소생성물에 관한 연구는 거의 수행되지 않았다. 한국공업규격에는 등근 봉상으로 만든 양초의 품질 시험을 규정하고 있다. 품질 시험항목으로는 납의 함량, 굳는 점, 내열 시험 및 연소 시 미연소 되는 양초의 양을 시험하여 양초의 품질을 규정하고 있으며,¹³ 연소생성물에 관한 규정은 아직 마련되어 있지 않다.

양초 연소 생성물의 방출 평가를 위해서는 규격화된 연소실에서 양초를 연소시켜 방출되는 연소생성물들에 관한 연구가 진행되고 있다. 현재 보고된 연구들의 연소실 규모는 30 m^3 이상의 실제 모델룸이나⁷ 1 m^3

이상의 시험챔버를 제작하여 사용하고 있다.^{6,9,14-15} 최근 독일에서 연구된 1 m^3 이하의 원형 고깔모양 챔버의 규격은 약 0.17 m^3 의 규모로 팬은 없으나 챔버의 형상과 굴뚝의 길이를 충분히 하여 양초가 연소중인 실내 상태를 유도했다.^{8,16} 이처럼 연소실의 크기가 클수록 연소실 안에서 연소된 양초의 생성물들이 배출구로 배출되는 조성이 일정하여 배출구에서 채취된 배출가스를 채취하면 대표성을 확보할 수 있다. 그러나 부피가 큰 연소실 일수록 비용이 많이 소요되고 실험과정의 바탕값을 관리하기가 힘든 단점도 있다. 따라서 이 연구에서는 티라이트가 실내에서 나타내는 연소속도를 재현하고 배출구에서 균질한 연소생성물 조성을 얻을 수 있는 소형 연소실 제작을 목표로 하였다. 그리고 이러한 조건을 만족하는 연소실을 이용하여 향초나 보온용으로 사용되는 캔들라이트의 연소생성물의 조성과 농도 및 연소생성물들의 질량단위 방출계수를 산출하는 부피가 큰 대형 연소실의 기존 결과들과 비교 검토하였다.

이 연구에 사용된 0.008 m^3 의 작은 부피의 연소실로도 연소생성물들의 질량단위 방출계수를 구하여 양초 연소가 실내공기질에 미치는 영향을 판단하는데 활용할 수 있었다.

2. 실험 및 방법

2.1. 시료

실험에 사용할 양초는 0.008 m^3 벨자 안의 연소 영역에 들어갈 수 있는 직경 100 mm 이하이며 유리 접시 아래 12 cm 높이의 공간 안에서 연소시킬 수 있는 높이로 마련하였다.

따라서 이 연구에서는 사용한 양초는 높이가 14.3 mm인 티라이트(화이트티라이트30P, 리빙탑스, Korea)를 시중에서 구입하여 사용했다. 사용한 티라이트의 심지는 면으로 되어있으며 길이는 10.7 mm, 두께는 1.8 mm이다. 티라이트의 주성분은 파라핀이며 직경

37.0 mm, 높이 14.3 mm의 알루미늄용기에 담겨있고 중량은 약 14 g이다. 시료로 사용한 티라이트로 실내 연소 조건에서 4 시간 동안 연속 연소가 가능하다.

2.2. 연소실

0.0008 m³와 0.008 m³의 유리로 된 벨자를 이용하여 연소실을 제작하여 양초(티라이트)의 연소속도를 검토하였다. 최종적으로 연소실은 0.008 m³ 벨자를 사용하여 제작하였다. 제작된 연소실은 직경 187 mm, 높이 240 mm이며 윗부분의 배출구 직경은 50 mm이다.

벨자 좌측에 공기공급라인을 넣을 수 있는 구멍을 통해 내부 직경 0.37 mm의 테플론관을 이용하여 공기를 공급하였다. 벨자 내부에서는 공기 공급관을 상부에 구멍을 낸 페트리접시에 연결하여 공급된 공기가 벨자 상부로 고르게 공급될 수 있는 구조로 제작하였다. 벨자 하단의 기밀성을 확보하기 위하여 실리콘 패드를 깔고 PE 랩을 덮고 그 위에 원형 유리판을 깔아 벨자에 끼워 넣었다. 최종적으로 선택된 0.008 m³ 벨자의 모식도를 Fig. 1에 나타냈다.

2.3. 공급 공기 및 유량 측정

벨자 내 양초 연소에 필요한 공기를 공급하기 위해 Oilless 형의 공기 공급 장치(SAC-300, Top trading, Korea)를 이용하였다.

공기 공급 유량은 로터미터(AACBORG, Monsey, USA)를 이용하여 조정하였다. 연소실 벨자 내부의 기밀성은 공급공기와 배출 공기량을 비교하여 확인하였다. 연소실 출구의 배출공기 유량은 로터미터(Brooks, U.S.A)를 이용해 측정하였다. 공급공기와 배출 공기의 측정 유량은 질량 유량 측정 장치(M-5SLPM-D/5M, AlicatScientific, U.S.A)로 보정 하여 확인하였다.

2.4. 온도 측정

온도는 T type 열전대(Omega, U.S.A)을 이용하여 측정하였고 데이터 로거(Agilent 34970A, U.S.A)를 이용해 1 초 간격으로 10 분간 데이터를 수집하였다.

2.5. 시료 채취 및 분석

2.5.1. VOC 채취 및 분석

양초 연소생성물 시료는 벨자 안에 양초를 접화하여 넣고 15 분간 안정화한 후 벨자 배출구에서 채취했다. 시료는 펌프(FV-201D, Y=Top trading, Korea)를 이용하여 100 mL/min으로 Tenax TA가 충전된 스테인리스 재질의 흡착관(Markes, UK)에 3 L 채취했다.

Tenax-TA 흡착관에 채취된 시료는 자동열탈착장치(ATD 50, Perkin Elmer, USA)가 장착된 GC/MS(QP 2010, Shimadzu, Japan)를 사용하여 Table 1과 같은

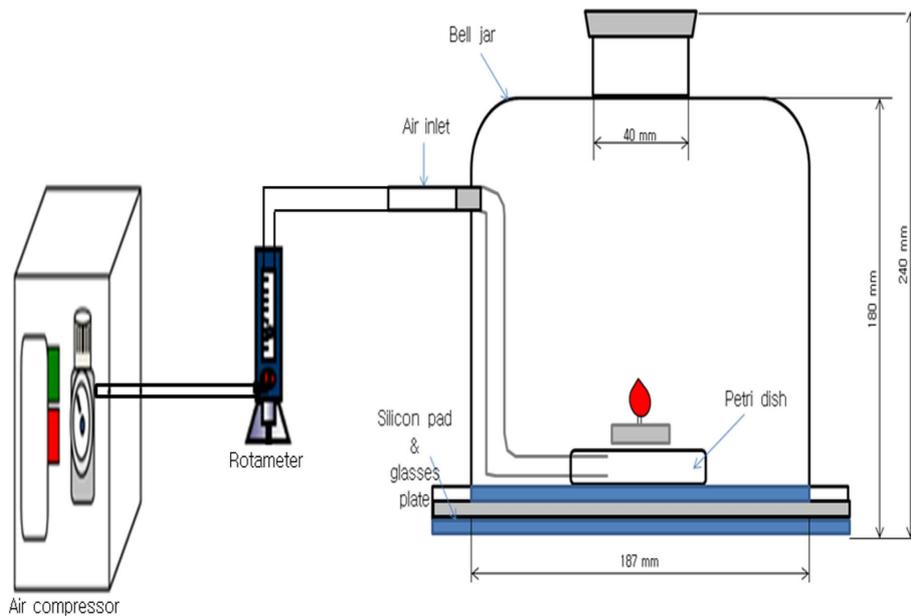


Fig. 1. Schematic diagram of 8 L bell jar.

Table 1. Analytical conditions of TD-GC/MS

TD (ATD 50, Perkin Elmer, USA)	
Tube desorption	300 °C for 10 min, 45 mL/min (N ₂ gas)
Cold trap temp.	-30 °C
Trap desorption	320 °C (15 min)
Transfer line temp.	200 °C
Split flow during Trap desorption	20 mL/min
Split ratio	20:1
GC/MS (QP-2010, Shimadzu Japan)	
Column	ZB-1MS (60 m × 0.25 mm I.D., 0.25 μm film, Phenomenex, USA)
Carrier Gas	He, 1.06 mL/min
Oven temp	40 °C(5 min)→7 °C/min→250 °C → 10 °C/min→300 °C (10 min)
Ion source temp.	200 °C
Interface temp.	270 °C
Ionization	EI 70 ev

조건으로 분석하였다.

VOC의 정량은 분석으로 얻은 TIC에서 각 물질들의 면적을 톨루엔등가 검량선식을 이용하여 계산하였다. 톨루엔 표준용액은 25, 50, 100, 200 및 400 ng/μL의 농도로 제조하여 검량곡선 제작 시료에 사용하였다. 검량곡선은 각 농도의 톨루엔 표준용액 2 μL를 Tenax TA 흡착관에 주입하고 고순도 질소(99.999%, 대덕가스)를 80 mL/min의 유량으로 4분간 퍼지시킨 후 Table 1의 시료와 동일한 분석조건으로 분석하여 작성하였다. 이렇게 얻어진 검량곡선의 결정계수는 0.9997 이었다.

2.5.2. 알데하이드 채취 및 분석

알데하이드는 2,4-DNPH-cartridge(Supelco, USA)에 500 mL/min 유속으로 30분간 15 L 채취하였다. 채취된 시료는 유도체 및 유도화 시약이 충분히 용출될 수 있도록 3 mL/min 이하의 유속으로 분석하기 바로 전에 아세트나이트릴(HPLC-grade, B&J Acs, USA) 5 mL로 용출하였다. 이동상의 조성은 아세트나이트릴과 물(65:35)의 조건으로 50분 동안 isocratic 방법으로 Table 2의 조건에 따라 분석하였다. 검량곡선은 DNPH로 유도화 된 카르보닐 표준용액(Carbonyl-DNPH Mix, Supelco, USA)을 이용하여 작성하였으며 폼알데하이드, 아세트알데하이드, 아세톤 및 뷰틸알데하이드의 결정계수는 모두 0.99 이상을 나타냈다. 벤즈알데하이드는 GC/MS를 이용하여 정량하였다.

Table 2. Analytical conditions of HPLC

HPLC	Waters, module 1
Detector	UV/vis 360 nm
Column	Apollo C18, 250 mm × 4.6 mm, 5 μm particle (Alltech)
Flow rate	1.0 mL/min
Mobile phase	ACN:Water(65:35)
Injection volume	20 μL

3. 결과 및 고찰

3.1. 공급공기량 결정

연소실에서 양초의 연소 조건을 실내에서 나타내는 양초의 연소 속도를 재현할 수 있도록 공급 공기량을 결정하였다. 시료로 사용한 양초의 실내 연소는 2.83 ± 0.18 g/h의 연소 속도를 가지고 있다. 이러한 실내연소 속도를 재현하기 위해서 연소 시 필요한 공급공기 유량을 결정하기 위해 0.0008 m³, 0.008 m³ 부피의 벨자 형태의 연소실에서 공급 공기 유량에 따른 양초의 연소 속도를 검토 하여 Fig. 2에 나타냈다. 시료로 사용한 양초 파라핀의 탄소수를 25라고 가정했을 때 양초 2.83 g이 완전 연소하는데 필요한 이론공기량은 525 mL/min 였다.

Fig. 2에 연소실의 규격에 따른 공급 공기량의 변화에 따른 연소 속도를 비교하여 나타냈다. 두 연소실 모두 이론공기량의 1 배수에서 3 배수 까지는 공급공기량의 증가에 따라 양초의 연소 속도도 증가하였다. 그러나 이론공기량의 3 배수 이상에서는 양초의 실내 연소속도와 유사하게 나타났다. 이론공기량의 3 배인 1575 mL/min을 공급했을 때 0.008 m³ 연소실에서는

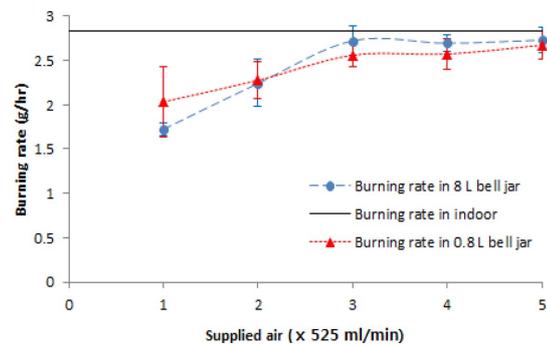


Fig. 2. Comparison of a burning rate of candle between 0.8 L and 8 L combustion bell jar according to the supplying air.

실내 연소 속도에 96% 해당하는 2.72 ± 0.17 g/h, 0.8 L 연소실에서는 2.56 ± 0.13 g/h로 실내 연소 속도의 91%를 나타냈다. 벨자의 크기에 따른 양초의 연소속도 차이는 크지 않았으며 공급된 공기가 양초의 연소에 모두 사용되지 않고 배출되는 부분이 있기 때문으로 생각된다. 0.17 m^3 의 연소실을 사용한 연소실험에서도 실내 연소속도를 재현하기 위하여 연소실에 10 L/min ~15 L/min의 공기를 공급하였다.¹⁷

그래서 연소실 내 공기 공급 유량은 양초의 실내 연소 상태를 유사하게 재현할 수 있는 이론공기량의 3배수에 유량의 안정성을 고려하여 205 mL/min을 더한 1,800 mL/min으로 결정하였다.

3.2. 연소 가스 조성의 균질성

3.2.1. 배출가스 온도를 이용한 균질성 확인

이 연구는 연소생성물의 조성을 밝히는 것이 목적이외에 단위 무게 당 양초의 연소생성물 방출 속도를 측정할 수 있는 연소실 제작을 목적으로 하고 있다. 그러므로 연소생성물의 방출 속도를 얻기 위해서는 배출구에서 가스 배출량과 연소생성물이 배출구에서 균질한 농도로 배출시키는 구조의 연소실의 구조가 필요하다. 배출가스의 조성이 균일해야 채취한 양초 연소 생성물질의 분석 결과를 바탕으로 연소생성물의 방출속도를 산정 할 수 있기 때문이다. 배출가스의 연소 생성물의 조성을 일정하게 하여 균일성을 확인하는 방법으로 연소실 내부의 여러 지점에서 채취한 시료를 분석하여 균일성을 확인 하는 방법이 있다.

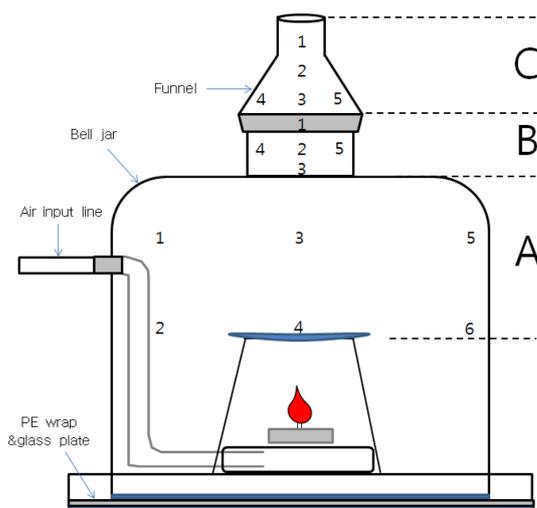


Fig. 3. Temperature measuring point in the 8 L combustion chamber.

이 연구에서는 0.008 m^3 연소실 내부의 지점별 배출 가스의 온도 분포를 통하여 일차적으로 양초 연소 배출가스의 균질성을 알아보았다. 온도 측정은 0.008 m^3 벨자 내부의 중간과 상부의 각 3 지점과 배출구에 상하 좌우로 5 지점을 정하여 10 분간의 평균 온도를 통하여 배출가스의 균질성을 확인하였다.

Fig. 3은 제작된 연소실의 모식도에 온도 측정 지점을 나타낸 그림이다. 최종적으로 설계된 0.008 m^3 연소실은 일차적으로 Fig. 1의 연소실 내부에 삼발이를 놓고 그 위에 유리접시를 놓아 티라이트의 용도와 같이 양초 불꽃이 용기를 가열하는 형상을 모사한 구조로 변경하였다. 그리고 연소실 배출구에 깔때기 모양의 유리 관으로 배출구의 길이를 100 mm 연장하였으며, 연소실 출구의 직경을 40 mm에서 25 mm로 좁혔다. Table 3에 연소실의 구조 변화에 따른 각 지점의 10 분간 평균 온도를 나타냈다.

Fig. 1의 0.008 m^3 벨자 만을 사용한 연소실 구조에서는 양초 불꽃 부근 영역 A(A-3, A-4)과 주변(A-1, 2, 5, 6)의 온도차이가 $150 \text{ }^\circ\text{C}$ 로 연소실 내부의 온도 차이가 매우 크게 나타났다. 그리고 연소 가스가 모여서 빠져나가는 배출구 영역 B의 중앙(B-2)을 중심으로 상하좌우(B-1, 3, 4, 5)의 평균 온도 분포도 $78 \sim$

Table 3. Distribution of temperature at each points of combustion chamber

Site	Temperature ($^\circ\text{C}$)			
	Type 1 ^{a)}	Type 2 ^{b)}	Type 3 ^{c)}	
A	1	30.3 ± 0.01	41.8 ± 0.02	62.9 ± 0.06
	2	22.1 ± 0.03	36.4 ± 0.01	44.0 ± 0.02
	3	154.9 ± 0.14	45.8 ± 0.02	59.3 ± 0.02
	4	187.2 ± 0.52	-	-
	5	27.5 ± 0.03	48.4 ± 0.05	56.2 ± 0.02
	6	20.8 ± 0.05	49.5 ± 0.02	48.2 ± 0.02
B	1	77.8 ± 0.19	26.7 ± 0.07	42.9 ± 0.05
	2	115.4 ± 0.26	29.9 ± 0.08	44.7 ± 0.05
	3	128.7 ± 0.20	36.3 ± 0.08	55.2 ± 0.05
	4	104.5 ± 0.48	12.9 ± 0.19	36.5 ± 0.03
	5	134.5 ± 0.20	33.2 ± 0.10	48.3 ± 0.08
C	1	-	-	34.5 ± 0.04
	2	-	-	37.7 ± 0.03
	3	-	-	40.9 ± 0.04
	4	-	-	37.4 ± 0.02
	5	-	-	38.4 ± 0.06

a) Type 1; 0.008 m^3 bell jar only, b) Type 2; glass dish is installed in 0.008 m^3 bell jar, c) Type 3; glass dish is installed in 0.008 m^3 bell jar and lengthened exhaust outlet

129 °C로 넓었으며 불꽃에서 멀어질수록 낮은 온도를 나타냈다. 이러한 온도 분포는 양초 불꽃이 배출구의 가장 윗부분(B-1)까지 영향을 미치고 있다는 것을 의미한다. 그러므로 양초 불꽃의 영향으로 인하여 배출구 각 지점의 연소 생성물의 조성은 균질하지 않다고 판단할 수 있다. 이렇게 양초의 불꽃이 시료 채취 지점에 직접 영향을 미치는 것은 연소실의 부피를 크게 하면 배제할 수 있다. 그러나 이 연구의 목적이 양초의 연소생성물 방출속도를 산출하기 위한 소형 연소실을 제작하는 것이다. 그러므로 이러한 양초 불꽃의 영향을 배제하는 방안으로 유리 접시를 불꽃 위에 설치하여 불꽃의 직접적인 영향을 배제함과 동시에 티라이트 본연의 용도인 용기를 가열하는 조건을 모사할 수 있었다.

유리 접시를 설치한 연소실 내부(A 영역)온도도 36 °C~50 °C로 불꽃의 직접적인 영향이 배제된 것을 알 수 있었으며, 연소실 배출구(B 영역)의 온도 분포는 13~36 °C로 B-4 지점의 온도가 실온과 가까운 온도를 나타냈다. 이는 배출구로 찬 실내의 공기가 역으로 유입될 가능성을 생각할 수 있다. 연소실의 배출구 길이가 60 mm로 직경(40 mm)에 비해 상대적으로 낮다. 그래서 실내의 공기가 배출구를 통하여 연소실로 역 유입되는 것을 스모크 실험을 통하여 확인할 수 있었다. 배출구로 외기가 유입되면 연소 생성물 배출가스와 외기가 섞여 연소실의 배출구에서 균질하지 못한 연소생성물의 농도를 나타내므로 연소실 배출가스량을 이용하여 양초의 연소 생성물 방출속도를 결정할 수 없다. 이러한 문제를 해결하기 위해 높이 10 cm의 깔때기 모양의 유리관을 배출구 위에 설치하여 배출구의 길이를 높이고 배출구의 직경을 좁혀 외기가 연소실 내부로 역 유입되지 않는 구조로 변경하였다. 배출구를 변경한 연소실에 실내 외기가 유입되지 않는 것은 스모크 실험을 통하여 확인하였다.

최종적으로 결정된 0.008 m³ 연소실은 내부에 유리 접시를 설치하고 길이가 길고 직경이 좁은 배출구를 설치한 형태로 결정되었으며 모식도를 Fig. 3에 나타냈다. 유리접시와 좁고 긴 배출구를 가진 연소실의 배출구 연장 부분(C 영역) 중앙의 상하(C-1, 2, 3) 좌우(C-3, 4, 5) 온도분포 간 온도 차이는 3 °C로 작게 나타났다. 또한 길고 좁아진 배출구의 구조로 인하여 기존 배출구 부분(B 영역)의 온도도 평균 28 °C에서 평균 48 °C로 증가하였다. 그리고 외기가 유입되어 낮은 온도를 나타냈던 B-3 지점의 온도도 55 °C로 상승한 것을 확인 하였다.

이처럼 연소실 배출구의 각 부분의 온도 분포가 일정하게 나타나는 것을 통하여 제작된 연소실은 실내공기의 유입이 없으며 연소실로 공급되는 공기와 연소생성물만이 균질하게 배출되는 것을 일차적으로 확인 하였다.

3.2.2. 연소실 배출구 연소 가스 조성의 균질성

연소실 배출구의 배출가스 온도가 균일하도록 설계된 연소실 배출가스 조성의 균질성을 배출구 각 지점의 배출가스 조성을 분석하여 이차적으로 배출가스의 균질성을 확인하였다. 연소 가스는 양초의 연소속도 산출을 위한 시료채취지점(C-3)의 상하(A-2, B-1)지점 및 좌우(A-4, A-5)지점을 포함한 5 지점에서 채취하여 연소 생성물의 농도를 비교하였다.

유리접시가 설치되지 않은 연소실의 연소 생성물의 조성은 와일리 라이브러리(ver. 9.0)에서 확인된 4,2,5-다이페닐벤조퀴논이 지배적인 물질로 나타났다. 이 화합물은 양초 왁스의 중간 분해 물질로서 현재 널리 사용되고 있는 농축 열탈착-GC/MS의 분석과정에서 정량적으로 흡탈착하기 어려워 후속 분석 때에 메모리 효과를 나타내서 분석에 영향을 주었다. 이러한 준휘발성화합물의 영향은 시료 채취 흡착관 앞에 1 cm의 석영솜을 연결한 후 시료를 채취하여 배제할 수 있으며 연소생성물의 평가에서는 제외하였다.

Table 4에 양초 불꽃의 직접 영향을 받는 연소실과 양초 불꽃의 직접적인 영향을 배제한 연소실에서 채취된 연소 생성물 중 총휘발성유기화합물의 범위에 있는 주요 화합물의 농도조성을 비교하여 연소실 내 유리접시의 설치 효과를 나타냈다.

준휘발성화합물인 4,2,5-다이페닐벤조퀴논을 제외하여도 양초 불꽃의 직접적인 영향을 받는 연소실에서는 페닐프로피온산이 294.95±100.20 µg/m³으로 벤즈알데하이드와 같은 VOC류에 비하여 100 배 정도 높게 나타났다. 이는 양초 불꽃의 직접적인 영향으로 판단된다. 이와 대조적으로 유리접시가 설치된 연소실의

Table 4. Effect of glass dish in the combustion products

Compound	Concentration (µg/m ³)	
	Without glass dish	With glass dish
Benzaldehyde	1.47 ± 0.74	16.66 ± 0.71
Benzonitrile	1.03 ± 0.40	7.96 ± 0.45
Benzoic acid	0.14 ± 0.20	20.28 ± 4.41
Phenylpropionic acid	294.95 ± 100.20	19.48 ± 3.87
Phenylmaleic anhydride	2.21 ± 0.25	30.73 ± 3.03

Table 5. TVOC and High rank concentration compound of 5 site in bell jar

Outlet Site	Concentration ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)				
	Benzaldehyde	Benzonitrile	Benzoic acid	Phenylmaleic anhydride	TVOC
Lower side of center (B-1)	16.71	8.23	22.26	31.55	90.74
Upper side of center (A-2)	16.63	8.30	21.63	32.39	92.27
Center (A-3)	17.87	8.45	26.98	34.13	100.96
Left side of center (A-4)	15.60	7.28	14.86	26.32	72.49
Right side of center (A-5)	16.48	7.56	15.69	29.25	77.95
Average	16.66 ± 0.71	7.96 ± 0.45	20.28 ± 4.41	30.73 ± 2.65	86.88 ± 10.08
RSD, (%)	4.86	6.44	24.78	9.85	13.24

배출가스 분석 결과는 페닐프로피온산의 농도가 $19.48 \pm 3.87 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 으로 93.4% 감소하였다. 반면에 벤즈알데하이드, 벤조나이트릴과 벤조산 및 페닐말레산 무수물은 각각 $16.66 \pm 0.71 \mu\text{g}/\text{m}^3$, $7.96 \pm 0.45 \mu\text{g}/\text{m}^3$, $20.28 \pm 4.41 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 으로 나타나 각각 10.3 배, 6.7 배 및 143.9배 증가하였다. 이는 양초가 유리접시를 가열하며 유리접시 밑바닥으로 불꽃이 퍼져서 연소가 더 진행되고 페닐 프로피온산이 연소와 흡착 등으로 제거되어 나타난 결과로 생각된다. 그러므로 연소실 내에 유리 접시를 설치하여 불꽃의 직접적인 영향을 배제하는 것이 부피가 작은 연소실을 이용한 실내 양초 연소생성물의 연구에 적합한 구조인 것을 알 수 있었다. 이처럼 연소실의 운전 방법에 따라서는 작은 부피의 연소실이 큰 부피의 연소실보다 분자량이 큰 연소생성물들의 연구에 활용될 가능성을 확인하였다.

최종적으로 설계된 연소실 배출구의 시료채취지점과 채취지점의 상하 좌우 지점을 포함한 5 지점에서 연소 생성물을 채취하여 Table 5에 총휘발성유기화합물의 범위안에 포함되는 연소생성물들의 정량 결과를 나타냈다.

배출구 5 곳에서 총휘발성 유기 화합물과 주요 방출 화합물들의 상대표준편차는 총휘발성 유기화합물이 13%, 벤즈알데하이드, 벤조나이트릴, 벤조산 및 페닐말레산무수물들은 각각 4.86%, 6.44%, 24.78% 및 9.85%를 나타냈다. 이들 화합물중 극성 물질인 벤조산을 제외하면 10% 이하의 상대표준편차를 나타내고 있다. 이 결과는 비극성 탄화수소 시료를 Tenax-TA로 채취하여 열탈착 GC/MS로 반복 분석하여 얻은 ISO 16000-6 방법의 반복 재현성 10%에 상당하는 것이다.¹⁷ 그러므로 제작된 연소실 배출구 배출가스의 연소생성물 조성은 균질하다고 판단된다.

3.3. 양초 연소 생성물의 조성

채취된 연소 생성물의 총이온크로마토그램과 주요 화합물들을 정성하여 Fig. 4에 나타냈다. Table 6에는 다중이용시설등의실내공기질관리법 제9조 신축 공동주택의 실내공기질 관리에서 관리하고 있는 물질인 BTEX 화합물들을 포함한 주요 휘발성 유기화합물(VOCs)들의 농도를 나타냈다.

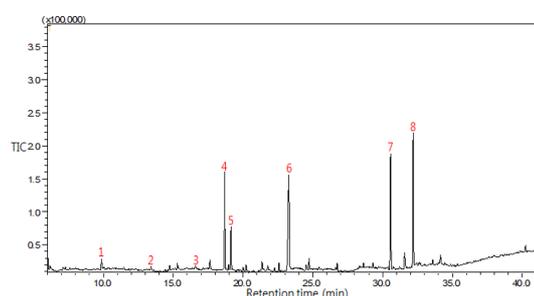


Fig. 4. TIC of combustion gas sampled at the A-3 site. 1; benzene, 2; toluene, 3; ethylbenzene, 4; benzaldehyde, 5; benzonitrile, 6; benzoic acid, 7; phenylmaleic anhydride, 8; 2-Phenylbenzoquinone.

Table 6. Volatile organic compound concentration of candle combustion products

No.	RT (min.)	Compound	Concentration ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)
1	9.86	Benzene	1.06 ± 0.21
2	13.40	Toluene	0.18 ± 0.04
3	16.86	Ethyl benzene	0.46 ± 0.06
4	18.69	Benzaldehyde	16.66 ± 0.71
5	19.14	Benzonitrile	7.96 ± 0.45
6	23.30	Benzoic acid	20.28 ± 4.41
7	30.57	Phenylmaleic anhydride	30.73 ± 2.65
8	32.20	2-Phenyl benzoquinone	50.22 ± 9.99

다중이용시설등의실내공기질관리법에서 관리하는 휘발성유기물질인 벤젠, 톨루엔, 에틸벤젠의 실내 공기중 관리농도는 각각 30 µg/m³, 1000 µg/m³, 360 µg/m³이다.¹⁸ 이에 비해 이 연구에서 사용한 연소실에서 연소한 양초에서 발생하는 연소가스 중 각 물질들의 농도는 각각 1.06±0.21, 0.18±0.04, 0.46±0.06 µg/m³으로 관리농도에 비하여 낮은 수준이었고, 관리물질 이외에 벤즈알데하이드, 벤조나이트릴 및 벤조산들의 농도 16.66±0.71, 7.96±0.45, 20.28±4.41 µg/m³에 비하여서 10 배 정도 낮은 농도를 나타냈다. 휘발성유기화합물류에서 다른 화합물에 비해 높은 방출을 보인 화합물은 모두 벤젠고리가 포함된 방향족 화합물이며 이는 양초 불꽃에 의한 열합성의 결과로 보인다. ISO 16000-6에서 규정하고 있는 총휘발성 유기 화합물의 농도는 평균 86.88 µg/m³이었으며, 가장 많이 방출되는 개별 화합물은 준휘발성유기화합물인 2-페닐벤조퀴논으로 약 50.22±9.99 µg/m³을 나타냈다.

연소생성물 중 알데하이드류의 농도를 Table 7에 나타냈다. 폼알데하이드는 105.76±6.81 µg/m³, 아세트알데하이드는 25.71±2.28 µg/m³, 아크롤레인+아세톤은 1.64±0.44 µg/m³, 뷰틸알데하이드는 10.89±2.16 µg/m³으로 폼알데하이드가 가장 높은 농도를 나타냈다. 정성된 연소생성물 중에서 폼알데하이드가 VOC

류와 알데하이드류 중 가장 높은 농도를 나타냈으며 이 농도는 실내공기질관리법에서 관리하는 농도 210 µg/m³의 절반에 해당하는 수준이다.

3.4. 양초 연소 생성물의 질량방출계수

이 연구에서 제작된 연소실의 성능을 기존 연구들의 양초 연소실험에서 사용한 연소실들과 비교하기 위하여 이 연구와 기존연구들에서 보고된 연소 생성물의 질량단위방출계수를 Table 8에 나타냈다.

연소생성물의 질량단위방출계수(EF_m)는 식 (1)과 같이 연소실 배출구에서 구한 연소생성물들의 농도에 사용한 연소실의 부피, 환기횟수, 사용한 양초의 갯수 및 시험에 사용한 양초의 연소실 내 연소량을 고려하여 산출한다. 이 연구에서 사용한 연소조건들은 연소실의 부피가 0.008 m³이며, 환기 회수는 11.8 회/h, 시간당 연소량은 2.72 g/h였으며 연소실 내에서 연소시킨 양초 한 개를 적용하여 산출하였다.

$$EF_{m,i} = C_i \times n \times \frac{V}{a} \times \frac{1}{B}$$

- EF_{m,i} = 연소생성물질 i의 질량단위방출계수(µg/g)
- C_i = 연소생성물질 i의 배출구 농도(µg/m³)
- n = 환기 회수(1/hr)
- V = 연소실 부피(m³)
- a = 양초의 갯수(n)
- B = 시간당 연소량(g/hr)

이 연구에서 0.008 m³ 연소실을 이용하여 측정된 양초의 연소생성물휘발성 중 유기화합물들의 질량방출속도는 벤젠, 톨루엔, 에틸벤젠이 각각 0.04 µg/g, 0.01 µg/g, 0.02 µg/g으로 나타났다. 벤젠, 톨루엔과 에틸벤젠의 질량단위방출속도는 Marco Derudi 등(2014)

Table 7. Aldehyde concentration of candle combustion products

Compound	Concentration (µg/m ³)
Formaldehyde	105.76±6.81
Acetaldehyde	25.71±2.28
Acrolein+Acetone	1.64±0.44
Butyraldehyde	10.89±2.16

Table 8. Comparison among emission factors measured for different chambers

Reference	This work	M. Derudi ¹⁶	M. Derudi ⁸	Okometric Study ²⁰	F. Maupetit ¹⁹	
Chamber size	0.008 m ³	0.17 m ³	0.17 m ³	50 m ³	32.3 m ³	
Emission factor (µg/g)	B	0.04	0.13	0.02~0.37	ND	<1.00
	T	0.01	0.23	0.03~0.46		<1.00
	EB	0.02		0.02~0.11		<1.00
	X		0.04	0.05~0.16		
	TVOC	3.81			5.36	
	FA	4.48	2.91		1.09	7.09~141.30
	AA	1.09	1.12		0.38	1.77~8.48
BZA	0.67	0.55			0.00~11.30	

B; Benzene, T; Toluene, EB; Ethyl benzene, X; Xylene, TVOC; Total volatile organic compound, FA; Formaldehyde, AA; Acetaldehyde, BZA; Benzaldehyde

의 0.17 m³ 연소실 및 Maupetit (2009)의 32.3 m³ 연소실에서 구한 방출속도의 범위안에 포함된다.^{8,19} 그리고 국제 양초협회에서 발표한 양초의 총휘발성 유기화합물의 질량단위방출속도 5.36 µg/g과²⁰ 이 연구의 3.81 µg/g은 시험에 동일한 양초를 사용하지 않은 것을 고려할 때 매우 유사한 질량단위방출계수라고 평가할 수 있다. 이처럼 보고된 양초의 질량단위방출계수의 차이는 실험에 사용한 각 양초 시료들의 유분의 함량이 다르고 유분의 함량이 높을수록 VOCs와 PAHs의 방출이 높은 결과를 나타낸다. 이처럼 연구마다 양초 연소생성물들의 질량단위방출계수의 편차는 연소실의 규격 이외에 실험에 사용한 각 시료의 유분 함량이 다른 것도 큰 요인으로 생각할 수 있다.

그리고 양초의 알데하이드류의 질량단위방출계수는 폼알데하이드, 아세트알데하이드 및 벤즈알데하이드가 각각 4.48 µg/g, 1.09 µg/g, 0.67 µg/g으로 VOC 류보다 높은 방출계수를 나타냈다. 기존 연구의 결과들과 비교할 때 세가지 알데하이드의 단위질량 방출계수들 모두 32.3 m³ 규격의 챔버를 사용한 Maupetit 등 (2009)의 결과와 50 m³ 연소실을 사용한 국제 양초협회(2007)의 결과 및 0.17 m³ 연소실을 사용한 Marco Derudi 등(2014) 이 보고한 질량단위 방출계수범위안에 포함되거나 같은 오더의 값을 나타내고 있었다. 각 연구의 알데하이드의 질량단위방출계수들 간의 차이점은 양초의 첨가제의 차이에 따라 알데하이드 질량단위 방출계수가 큰 영향을 미친다는 기존 보고를 고려하면 Table 8에 나타난 알데하이드의 방출속도 결과도 기존 연구와 유사한 값이라고 판단된다.

따라서 이 연구에서 제작한 0.008 m³ 부피의 소형 연소실에서 산출된 양초 연소 생성물질들의 질량단위 방출계수가 부피가 0.17 m³~50 m³ 연소실의 연구결과와 유사한 값을 나타내는 것을 확인하였고, 소형 연소실에서도 부피가 큰 챔버와 같이 실내 연소를 재연할 수 있다는 것을 알 수 있다.

이 연구에서 구한 티라이트의 질량단위방출계수를 이용하여 KS I 2007에 규정된 표준모델룸의 조건²¹ 40 m³에 환기횟수 0.7회의 실내에서 티라이트 양초 한 개가 연소하였을 때 실내공기 중 폼알데하이드와 총휘발성유기화합물의 예상농도는 각각 0.44 µg/m³와 0.38 µg/m³로 실내공기 중 관리농도 기준보다 매우 낮은 농도이지만 밀폐되거나 좁은 실내에서 다수의 양초를 동시에 밝힐 때는 양초로 인한 실내공기질의 저하를 고려하여야 한다.

4. 결 론

양초의 실내연소로 인한 실내공기질에 미치는 양초의 영향을 정량적으로 평가하기 위해서는 양초의 연소 생성물들의 성분을 알아야 하고 각 연소생성물들의 질량단위방출계수를 구하여야 한다. 양초의 연소생성물들의 질량단위방출계수를 구하기 위해서는 양초의 실내연소를 재연할 수 있는 연소실험이 필요하며 소형연소실을 사용할수록 취급과 장비의 구축 면에서 경제적이다. 이 연구에서는 양초의 실내연소를 모사하여 양초 연소생성물들의 질량단위방출계수를 구할 수 있는 0.008 m³ 부피의 소형 연소실을 제작하여 기존에 보고된 큰 부피의 연구결과들과 비교하여 유사한 성능을 나타내는 것을 확인하였다.

소형 양초 연소실은 양초의 실내연소속도를 재연할 수 있도록 연소실 외부에서 충분한 공기를 공급해 주어야 하며 이 연구에서는 양초의 시간당 실내 연소량 2.83±0.18 g/h을 재현하기 위해 이론공기량 1,575 mL/min의 3 배 이상을 공급해야 하였다.

그리고 양초의 불꽃이 소형 연소실의 배출구 시료채취점에 직접적인 영향을 배제하여야 한다. 이를 위해 가열용 양초의 형상을 모사하기 위해 연소실 내부에 유리 접시를 불꽃 위에 설치하는 것이 효과적이었다. 양초 불꽃이 배출가스 시료채취점에 직접 영향을 미치면 불꽃속에 포함된 다량의 준휘발성유기화합물로 인하여 Tenax-TA 흡착관을 이용하는 농축/열탈착-GC/MS의 일반 분석 조건에서는 큰 메모리 효과를 나타내서 분석의 어려움을 초래할 수 있다.

또한 균질한 연소생성물의 조성을 한 배출 가스를 얻기 위해서는 실내의 외부 공기가 배출구를 통하여 연소실로 역 유입되는 것을 방지 하여야 한다. 특히 직경이 넓고 짧은 배출구의 구조를 갖는 연소실의 경우에는 스모크실험을 통하여 효과적으로 역 유입 여부를 확인할 수 있다.

이 연구에서 산출한 티라이트 양초의 연소생성물들의 질량단위방출계수는 벤젠, 톨루엔, 에틸벤젠의 질량단위방출속도가 각각 0.04 µg/g, 0.01 µg/g, 0.02 µg/g으로 나타났으며 총휘발성 유기 화합물 방출속도는 3.81 µg/g으로 나타났다. 알데하이드류의 방출속도는 폼알데하이드, 아세트알데하이드 및 벤즈알데하이드가 각각 4.48 µg/g, 1.09 µg/g, 0.67 µg/g을 나타냈다. 양초 한 개가 실내에서 연소할때는 실내공기중 관리농도 기준에 미치지 못하는 작은 영향을 미치지만 밀폐되거나 좁은 실내에서 다수의 양초를 동시에 밝힐

때는 양초로 인한 실내공기질의 저하를 고려하여야 한다.

이처럼 이 연구에서 제작된 소형 연소실을 이용하여 다양한 양초들의 질량단위방출계수를 구하여 실내 연소로 인한 실내공기질에 미치는 영향을 평가하는데 유용하게 활용될 수 있을 것으로 생각된다.

감사의 글

이 연구는 2013년도 강원대학교 학술연구조성비로 연구하였음(과제번호-C1009715-01-01).

References

1. J. J. Xie, X. Wang, G. Sheng, X. Bi and J. Fu, *Atmos. Environ.*, **37**(24), 3365-3374 (2003).
2. K. Slezakova, M. C. Pereira and M. C. Alvim-Ferraz, *Atmos. Environ.*, **43**(3), 486-493 (2009).
3. S. C. Lee, W. Li and L. Yin Chan, *Sci. Total Environ.*, **279**(1-3), 181-193 (2001).
4. S. Taner, B. Pekey and H. Pekey, *Sci. Total Environ.*, **454-455**, 78-87 (2013).
5. L. Stabile, F. C. Fuoco and G. Buonanno, *Build. Environ.*, **56**, 184-191 (2012).
6. S. Zai, H. Zhen and W. Jia-song, *J. Aerosol Sci.*, **37**(11), 1484-1496 (2006).
7. A. Manoukian, E. Quivet, B. Temime-Roussel, M. Nicolas, F. Maupetit, and H. Wortham. *Environ. Sci. Pollut. Res.*, **20**, 4659-4670 (2013).
8. M. Derudi, S. Gelosa, A. Sliepcevich, A. Cattaneo, R. Rota, D. Cavallo, and G. Nano, *Environ. Sci. Pollut. Res.*, **21**, 4320-4330 (2014).
9. T. Petry, D. Vitale, F. J. Joachim, B. Smith, L. Cruse, R. Mascarenhas, S. Schneider, and M. Singal, *Regulatory toxicol. Pharmacol.*, **69**, 55-70 (2014).
10. S. Orecchio, *Atmos. Environ.*, **45**(10), 1888-1895 (2011).
11. European Committee for Standardization, CEN TC 369, Candle fire safety, EN 15493:2007 - Specification for fire safety, European Union.
12. European Committee for Standardization, CEN TC 369, Candle fire safety, EN 15426:2007 - Specification for sooting behaviour, European Union.
13. Korean Industrial Standards, KS M 2722:2014, Republic of Korea.
14. S. C. Lee and B. Wang. *Atmos. Environ.*, **40**(12), 2128-2138 (2006).
15. M. Ongwandee and W. Pipithakul, *J. Environ. Res.*, **32**(1), 69-79 (2010).
16. M. Derudi, S. Gelosa, A. Sliepcevich, A. Cattaneo, R. Rota, D. Cavallo and G. Nano, *Atmos. Environ.*, **55**, 257-262, (2012).
17. ISO 16000-6, Indoor air – Part 6 : Determination of volatile organic compounds in indoor and test chamber air by active sampling on Tenax TA® sorbent, thermal desorption and gas chromatography using MS/FID.
18. Ministry of Environment Notification No. 550(2014. 03. 23.), Republic of Korea.
19. F. Maupetit and F. Squinazi, *Environ. Risques & Sante.*, **8**, 109-118 (2009).
20. National Candle Association, <http://candles.org/wp-content/uploads/2014/05/2007Okmetricstudysummary.pdf>.
21. KS I 2007, Determination of the emission of formaldehyde and volatile organic compounds from furniture and building related products Large chamber method.