

생물성 연소에서 발생하는 미세먼지 배출계수 개발에 관한 연구: 고기구이를 중심으로

A Study on the Development of Particulate Matters Emission Factors from Biomass Burning: Mainly Commercial Meat Cooking

박성규 · 최상진* · 김진윤 · 이호진¹⁾ · 장영기¹⁾ · 봉춘근²⁾ · 김종호³⁾ · 황의현⁴⁾
(주)케이에프이앤이 코퍼스트R&D센터, ¹⁾수원대학교 환경에너지공학과
²⁾그린솔루스(주), ³⁾한서대학교 환경공학과, ⁴⁾경북도립대학 토목과
(2011년 3월 1일 접수, 2011년 4월 18일 수정, 2011년 6월 22일 채택)

Seong-Kyu Park, Sang-Jin Choi*, Jin-Yun Kim, Ho-Jin Lee¹⁾, Young-Kee Jang¹⁾,
Choon-Keun Bong²⁾, Jong-Ho Kim³⁾ and Ui-Hyun Hwang⁴⁾
KOFIRST R&D Center, KF E&E Co. Ltd.

¹⁾*Department of Environmental & Energy Engineering, Suwon University*

²⁾*Green-solus Co. Ltd.*, ³⁾*Department of Environmental Engineering, Hanseo University*

⁴⁾*Department of Civil Engineering, Gyeongbuk Provincial College*

(Received 1 March 2011, revised 18 April 2011, accepted 22 June 2011)

Abstract

In this study, PM emission factors for commercial meat cooking were developed by the experiment using the similar restaurant model. The commercial material types of meat cooking were beef, pork and duck. And meat cooking materials were classified with marinated and raw cooking methods. The marinated and raw cooking methods were flat griddle (LPG) and under fired charbroiling grill. As a results, PM₁₀ emission factors for underfired pork cooking was estimated as 7.39 g/kg-meat which was the highest value in this study. The emission factors of under fired charbroiling grill method were higher than that of flat griddle method regardless of meat cooking material types and marinated meat. The particle size distribution of meat cooking was 0.23~5 μm and median diameter was 2~2.5 μm.

Key words : Meat cooking, PM, Emission factor

1. 서 론

생활수준의 향상에 따라 환경의 질에 대해 관심이

점차 증가하면서 일반 생활에서 발생하는 대기오염 물질에 대한 관심이 높아지고 있다. 그 중에서도 최근 미세먼지(PM₁₀)의 경우 우리나라의 농도 수준이 다른 나라에 비하여 높고 인체 위해성을 고려한 대기관리의 필요성이 점차 높아지고 있다. 이러한 미세먼지로부터 발생하는 피해를 줄이기 위해서는 정확

*Corresponding author.

Tel : +82-(0)31-429-0834, E-mail : kofirstene@hanmail.net

한 배출목록(Emission inventory) 작성과 규제, 저감 대책 등이 필요하다. 하지만 현재 국내에서는 배출목록을 작성하기 위해 대부분 국외의 방법론과 배출계수에 의존하고 있다. 외국에서 제안된 배출계수를 사용하여 산출하는 것도 방법일 수 있지만, 이보다는 국내 실정에 맞는 산출 방법론의 적용과 이에 따른 배출계수 개발이 시급하다.

미세먼지는 기관지를 거쳐 폐에 침착, 각종 질환을 유발하는 대표적인 대기오염물질이다. 지름 $2.5\mu\text{m}$ 이하의 미세먼지는 인체 내 기관지 및 폐 내부까지 들어가기 쉬운 입자 크기이므로, 폐에 붙어 폐암을 일으킬 수 있다(EPA, 2010). 환경부는 1995년 1월부터 $10\mu\text{m}$ 이하의 미세먼지(PM_{10})를 대기환경기준으로 정해서 관리하고 있다. 환경기준이 설정되어 있는 PM_{10} 에 비하여 $\text{PM}_{2.5}$ 는 농도는 낮으나 인체에 미치는 영향은 더 커서 그동안 환경기준 설정의 필요성이 제기되어 왔다. 이미 미국과 EU, WHO 등에서는 $\text{PM}_{2.5}$ 대기환경기준을 강화하거나 신규로 설정하여 적용하고 있다. 대기중 $\text{PM}_{2.5}$ 농도가 증가하면 호흡계 질환 사망, 심혈관계 사망의 위험도는 증가하는 것으로 보고되고 있고, 우리나라의 대도시 미세먼지(PM_{10}) 중 $\text{PM}_{2.5}$ 가 차지하는 비율은 약 50~80%로 상당히 높은 것으로 나타났으며, 환경부는 초미세먼지($\text{PM}_{2.5}$)의 대기환경기준을 2015년 1월부터 시행하기로 발표하고 있다(한국대기환경학회, 2007).

대도시의 미세먼지 발생원은 주로 자동차, 산업시설, 도로 비산먼지, 고기구이 음식점, 숯가마, 화목난로, 이륜차, 중국 유입으로 구분되고 있다(박성규 등, 2009). 이중 자동차는 디젤차의 DPF 장치, CNG버스의 보급으로 개선의 수단으로 정책을 진행했으며, 도로 비산먼지 저감을 위해 진공 청소차의 도입 등 방안을 강구 중에 있지만, 생물성연소에 의한 미세먼지 배출원인 고기구이 음식점, 숯가마, 화목난로에 의한 배출원 관리에 대한 정책수단이 부재한 상황이다. 특히, 미세먼지 중 생물성 연소에 의한 비중 증가에 대한 고려가 필요한 실정이다. 미세먼지 중 생물성 연소에 의한 비중이 경기도의 경우 PM_{10} 배출원 중에서는 16.3%, $\text{PM}_{2.5}$ 배출원 중에서는 39.4%로 나타나고 있으며, 도심의 경우 생물성 연소의 대부분은 고기구이가 가장 비중이 클 것으로 예상하고 있다(국립환경과학원, 2009). 특히, 도심 내부에서 배출되는 생물성연소에 의한 배출원의 확산이 어려운 도심 내

부는 거리협곡(street canyon) 현상으로 인하여 배출된 오염물질의 확산이 매우 불리한 구조적 조건으로 도시의 거주자 및 근무자의 호흡기 질환 등 직접적인 피해를 유발 할 수 있다(Park et al., 2004). 고기구이 음식점 등에서 배출되는 미세먼지는 먼지 그 자체로서의 유해성 뿐만 아니라 발암물질인 다환방향족탄화수소류(PAHs)가 다량으로 함유 되어 있어 적극적인 배출원 제어가 필요한 실정이다(이효민 등, 2002).

음식점에서 발생하는 악취는 육류 및 생선구이점, 중화요리점, 튀김요리점 등의 각종 음식점 주방과 홀의 요리과정 또는 조리과정에서 발생하고 있다. 그러나 음식점에서 발생하는 악취에 대하여 국내에서 주로 사용되고 있는 처리 방법은 단순 환기 및 국소 배기 후 확산 희석하는 등의 매우 단순한 방법이 대부분으로 송풍기의 출구 측이 한 방향으로 향해 있어서 악취물질이 집중 배출되고 저기압일 경우 주변으로 악취물질이 확산, 민원이 증가하고 있는 실정이다(박성규 등, 2009). 또한, 기후변화에 관련한 많은 연구와 정책들이 온실가스 중심으로 추진되고 있는데, 최근 블랙 카본이 CO_2 다음으로 기후변화에 영향을 미치는 중요한 대기오염물질로 인식되고 있다. 도심 내부의 생물성 연소에 의해 배출되는 블랙 카본(Black Carbon)이 기후변화 원인물질로 작용하여 단기적인 도심 기온 상승을 유발하는 도시 열섬효과(Heat Island Effect) 발생할 수 있고, 블랙 카본이 단기적인 기온 상승 영향은 온실가스 영향보다 더 크게 작용함을 보고하고 있다(월드워치연구소, 2009; Ramanathan and Carmichael, 2008).

서울의 경우 고기구이 음식점은 약 1만개소로 숯, 가스를 이용하여 고기를 구울 때 발생하는 미세먼지는 연간 약 500톤으로 추정하고 있다. 이는 서울시내 대기 중 미세먼지의 약 2.4%를 차지하고 있지만(이준복 등, 2010), 현재 대부분의 고기구이 음식점에서는 후드, 송풍기 등을 통한 환기만 실시하고 있는 실정으로 고기구이 음식점 등에서 배출되는 미세먼지 및 악취 등을 줄이기 위해서는 적정 방지시설의 설치가 필요하다. 고기구이 시 발생하는 미세먼지는 외국에서도 대기관리의 큰 이슈이며, 미국 캘리포니아 지역에서는 이미 규제가 이루어지고 있다. 국내에서도 최근 고기구이로부터 발생하는 미세먼지에 대한 연구가 진행되고 있지만, 아직까지 국가적 배출목록 작성을 위한 신뢰성이 높은 배출계수가 개발되어 있

지 않은 실정이다.

따라서, 본 연구는 도심 내부의 생활성 연소 중 가장 많은 비중을 차지하는 고기구이에 의해 배출되는 미세먼지의 배출량을 파악하기 위하여 음식점에 주로 소비되는 육종별, 구이형태별, 연료별 미세먼지 배출계수를 개발하고, 배출되는 미세먼지의 특성을 파악하고자 하였다.

2. 연구방법

본 연구에서는 고기구이에서 배출되는 오염물질을 측정하기 위해 고기를 굽는 실제 음식점의 조건을 최대한 적용하였다. 이 방법은 모형 챔버 안에 한 개의 그릴만을 가지고 고기를 완전히 태우지 않고, 음식점과 유사한 형태로 대형 모형 챔버를 제작하여 테이블을 두고 일반 고기구이 음식점과 유사한 상황에서 먹기 좋은 상태까지 굽는 과정에 발생하는 미세먼지를 측정하였다.

기본적으로 시료 채취를 위한 장치의 구성은 실제 음식점에서 사용되고 있는 후드나 덕트 장치를 토대로 하였으며, 고기를 굽기 위해 사용되는 연료의 경우 가장 많이 사용되는 연료인 가스와 숯을 사용하여 실험을 실시하였다. 고기의 종류는 국립환경과학원(2009)의 설문조사 결과를 토대로 국내에서 구이용으로 가장 많이 소비되는 소, 돼지, 오리를 선정하였다.

2.1 배출계수 산출 실험

고기를 굽는 음식점에서 발생하는 미세먼지의 배출계수를 산출하기 위해 가로 600 cm, 세로 300 cm, 높이 240 cm의 대형 모형 챔버를 제작하여 실제 음식점 조건에 맞는 장치를 구성하였다. 대형 모형 챔

버 내부에는 실제 음식점에서 사용되고 있는 고기구이용 테이블 6개를 설치하였으며, 테이블 위로 6개의 후드와 1개의 덕트를 설치하였다. 후드의 지름은 8 cm 이며, 덕트의 지름은 25 cm이다. 덕트의 끝 부분에는 연소가스를 강제로 흡입할 수 있는 송풍기를 설치하였다. 시료채취를 위한 채취구는 연소가스의 흐름에 방해되지 않게 덕트에서 지름의 3배 이상 직관이 유지되는 지점에 설치하였다. 실제 음식점 조건을 갖춘 장치 구성은 그림 1과 같다.

연료를 연소시키고 고기를 굽는 동안 발생하는 배출가스의 측정은 그림 1의 장치 구성에서 설치해 둔 덕트의 채취구를 통해 채취하였다. 시료를 채취하고 농도를 분석하기 위해 사용된 장비는 굴뚝먼지 채취장치(ASTEK Stack Sampler)를 이용하여 등속흡인 하였다.

실험에 사용한 고기의 경우 우리나라에서 구이용으로 가장 많이 소비되고 있는 쇠고기, 돼지고기, 오리고기를 선정하였다. 구이형태는 생구이와 양념구이로 구분하였고, 구이방식은 그림 2와 같이 철판구이와 직화구이로 구분되었다. 철판구이와 직화구이에 사용한 연료의 경우 대형 음식점에서 고기류를 굽는데 가장 많이 사용하는 가스와 숯으로 구분하였으며, 가스는 LPG를 이용하였고, 숯은 일반음식점에서 많이 사용하는 야자나무숯을 사용하였다.

상기 조건을 바탕으로 실험을 계획한 결과 육종별, 구이형태별, 사용연료별로 총 10가지의 실험이 실시되었다. 실험조건은 9kg의 고기를 6개 테이블에 대하여 각 테이블당 1.5kg씩 굽는 방법으로 이를 3회 실시하여 총 27kg의 고기를 굽는 실험을 진행하였다. 고기구이 실험에 앞서 실행시간과 덕트 내의 흡입유속을 설정하기 위해 각 조건별로 예비실험을 시행하여 고기의 가장 먹기 좋은 상태까지의 굽기 정도를

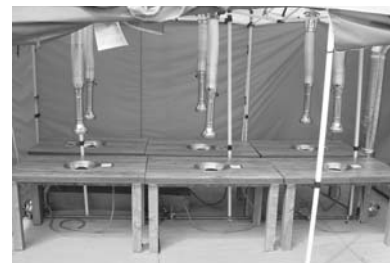
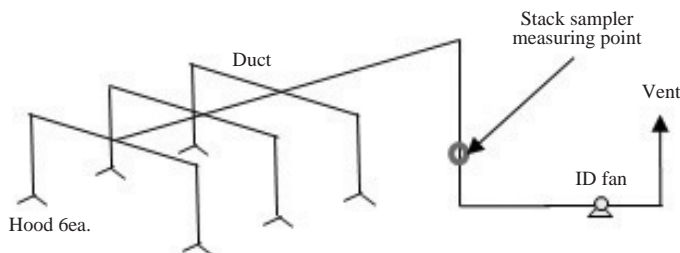


Fig. 1. A configuration of model for the actual commercial meat cooking.

실행시간으로 설정하였으며, 6개의 테이블에서 고기 구이 시 발생하는 가스의 흡입정도를 고려하여 덕트 내의 흡입유속을 설정하였다.

2.2 입경별 농도분포 실험

음식점에서 고기구이 시 양념 유무에 따른 구이방 식이나 철판과 직화방식, 사용연료에 따라 발생하는 미세먼지의 특성을 분석하기 위해 입경별 농도 분포를 확인하였다. 입경별 농도분포 측정에 사용한 측정기는 32채널 [0.25~32 μm (31channels), >32 μm]의 먼지입경을 측정할 수 있는 광산란방식의 Grimm

1.109 (Portable Aerosol Monitor, Grimm Aerosol Technik, Germany)를 사용하였으며, 등속흡인을 위해 Grimm 1.152 (Isokinetic channel probe, Grimm Aerosol Technik, Germany)를 사용하였다.

3. 실험결과

3.1 미세먼지 농도 결과

배출계수를 산출하기 위하여 배출농도를 실측하여 분석하였다. 미세먼지 측정농도와 실험 가동시간, 그

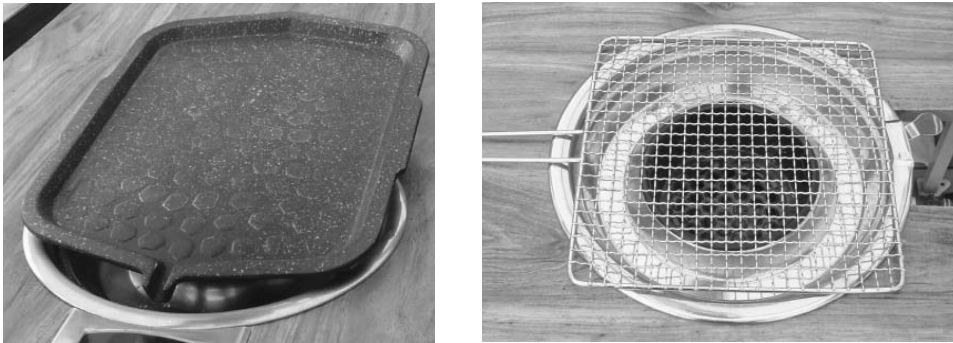


Fig. 2. Flat griddle and grill used in this experiments of commercial meat cooking.

Table 1. PM concentration results from beef cooking.

Meat sample	Equipment type (Fuel)	Sample No.	Sampling time (min)	Used meat weight (kg)	Exhaust gas volume (m ³)	Exhaust gas temperature (°C)			PM conc. (mg/m ³)
						Max.	Min.	Avg.	
Raw	Flat griddle (LPG)	1	42	9	871.9	48	33	44.2	5.42
		2	42	9	849.2	47	35	44.2	3.69
		3	42	9	861.8	41	35	42.3	3.69
		Avg.	42	9	861.0	45.3	34.3	43.6	4.27
	Under fired charbroiling grill	1	45	9	872.1	48	33	44.2	26.01
		2	45	9	804.6	49	36	46.2	30.63
3		45	9	747.9	52	35	45.8	37.42	
	Avg.	45	9	808.2	49.7	34.7	45.4	31.36	
Marinated	Flat griddle (LPG)	1	42	9	904.7	46	32	43.5	<0.01
		2	30	9	622.8	44	33	41.0	<0.01
		3	30	9	640.8	44	33	41.0	<0.01
		Avg.	34	9	722.8	44.7	32.7	41.8	<0.01
	Under fired charbroiling grill	1	45	5.44	834.3	47	31	43.5	42.26
		2	30	5.12	574.2	46	31	41.3	54.53
3		30	5.62	577.8	47	32	42.6	61.69	
	Avg.	35	5.39	662.1	46.7	31.3	42.5	52.82	

Table 2. PM concentration results from pork cooking.

Meat sample	Equipment type (Fuel)	Sample No.	Sampling time (min)	Used meat weight (kg)	Exhaust gas volume (m ³)	Exhaust gas temperature (°C)			PM conc. (mg/m ³)
						Max.	Min.	Avg.	
Raw	Flat griddle (LPG)	1	60	9	1,188.0	46	34	42.6	7.31
		2	60	9	1,274.4	43	39	42.0	14.68
		3	60	9	1,234.8	37	32	36.1	12.83
		Avg.	60	9	1,232.4	42.0	35.0	40.2	11.61
	Under fired charbroiling grill	1	60	9	1,119.6	48	31	43.3	56.60
		2	45	9	853.2	46	32	42.0	84.80
3		45	9	926.1	46	40	43.4	68.97	
Avg.		9	966.3	46.7	34.3	42.9	70.12		
Marinated	Flat griddle (LPG)	1	40	6.61	816.0	37	33	35.8	3.75
		2	30	9	556.0	36	33	34.5	8.50
		3	20	3	379.2	34	33	33.3	4.22
		Avg.	30	6.2	583.8	35.7	33.0	34.5	5.49
	Under fired charbroiling grill	1	45	5.86	877.5	57	37	48.6	20.00
		2	60	9	1,180.8	49	34	45.2	22.98
3		60	9	1,216.8	49	30	42.8	29.19	
Avg.		55	7.95	1,091.7	51.7	33.7	45.5	24.05	

Table 3. PM concentration results from duck cooking.

Meat sample	Equipment type (Fuel)	Sample No.	Sampling time (min)	Used meat weight (kg)	Exhaust gas volume (m ³)	Exhaust gas temperature (°C)			PM conc. (mg/m ³)
						Max.	Min.	Avg.	
Raw	Under fired charbroiling grill	1	30	3	276.16	33	29	31.5	14.6
		2	30	3	270.03	32	30	31.0	22.7
		3	30	3	276.96	34	31	32.5	23.2
		Avg.	30	3	273.10	33.0	30.0	31.7	20.2
Marinated	Under fired charbroiling grill	1	30	3	315.95	36	22	32.0	37.4
		2	30	3	288.60	35	32	33.0	42.1
		3	30	3	292.37	37	30	34.4	40.4
		Avg.	30	3	292.55	36.0	28.0	33.1	40.0

리고 실험에 사용된 고기량은 쇠고기의 경우 표 1과 같고, 돼지고기의 경우 표 2와 같고, 오리의 경우 표 3과 같다. 유량은 고기를 먹기 좋은 상태까지 구워지는 정도를 기준으로 고기불판에서 배출가스가 충분히 덩트로 배출 될 수 있도록 하여 조절하였다.

분석된 PM 농도를 보면, 쇠고기의 경우 전체적으로 3.7~61.7 mg/m³으로 분석되었으며, 평균 농도는 생구이 철판방식이 약 4.3 mg/m³, 직화방식이 약 31.4 mg/m³, 양념구이 직화방식이 약 52.8 mg/m³로 분석되었다. 양념구이 철판방식의 경우 3회 모두 여지의 무게변화가 매우 작아 농도를 분석하지 못하였다. 돼지

고기의 경우 구이방식에 상관없이 전체적으로 3.7~84.8 mg/m³으로 측정되었으며, 평균 농도는 생구이 철판방식이 약 11.6 mg/m³, 직화방식이 약 70.1 mg/m³, 양념구이 철판방식이 약 5.5 mg/m³, 직화방식이 약 24.1 mg/m³로 분석되었다. 또한, 오리고기의 경우 전체적으로 14.6~42.1 mg/m³으로 측정되었으며, 평균 농도는 생구이 직화방식이 약 20.2 mg/m³, 양념구이 직화방식이 약 40.0 mg/m³로 분석되었다.

쇠고기와 돼지고기의 구이에서 발생하는 미세먼지 농도는 쇠고기의 경우 양념구이 직화방식에서, 돼지고기의 경우 생구이 직화방식에서, 오리고기의 경우

양념구이 직화방식에서 가장 높게 나타났다.

3.2 입경별 농도분포 결과

그림 3은 고기구이에서 발생하는 미세먼지의 입경별 농도분포이다. 각각의 조리방식별로 고기를 구웠을 때 배출되는 미세먼지의 입경별 농도분포를 보면 모든 조리방식에서 입자직경이 2.5µm인 먼지가 높게 배출되는 것으로 나타났다. 구이형태에 따른 농도는 고기의 종류와 생구이 및 양념구이에 관계없이 철판방식보다는 직화방식(숯)에서 농도가 대체로 높은 것으로 나타났다. 특히, 양념된 고기를 화염과 직접 접촉시켜 굽는 방법인 양념구이 직화방식(숯)은 쇠고기와 돼지고기 모두 입자직경이 작을수록(0.4µm 이하) 농도분포가 높아지는 것을 알 수 있다. 이는 고기에 배어있는 양념이 화염에 직접적으로 접촉되어 입경이 작은 상태로 배출되는 것으로 추정된다.

3.3 배출계수 산출 결과

3.3.1 PM 배출계수

미세먼지 배출계수 산출방법은 미세먼지 농도에 덕트로부터 배기되는 가스량을 곱하고 고기사용량으로 나누어 산출한다. 배출계수 산출식은 다음과 같다 (Pechan, 2003; EPA, 1997).

$$\text{미세먼지 배출계수} \left(\frac{\text{g-PM}}{\text{kg-meat}} \right) = \frac{\text{미세먼지 농도} (\text{mg}/\text{m}^3) \times \text{배기가스량} (\text{m}^3)}{\text{고기사용량} (\text{kg}) \times 10^3}$$

측정 회차별 PM 배출계수는 쇠고기의 경우 0.35~6.48 g-PM/kg-meat로 산출되었으며, 돼지고기의 경우 0.53~8.05 g-PM/kg-meat로 산출되었으며, 오리고기의 경우 1.64~4.05 g-PM/kg-meat로 산출되었다. 각 실험 조건별 평균 배출계수를 정리하면 표 4 및 그림 4와 같다.

3.3.2 PM₁₀, PM_{2.5} 배출계수

PM₁₀과 PM_{2.5}의 배출계수를 산정하기 위하여 고기구이에서 발생하는 미세먼지 중 직경이 10µm 이하인 미세먼지 분율과 직경이 2.5µm 이하인 미세먼지 분율을 분석한 결과는 표 5와 같이 나타났다. 고기구이에서 발생하는 미세먼지의 입경별 질량농도 분율을 적용하여 PM₁₀과 PM_{2.5}의 배출계수를 산출하면 표 6과 같다.

고기구이에서 발생하는 미세먼지의 입경별 질량농도 분율을 분석한 결과, 모든 구이방식에서 발생하는 미세먼지는 PM₁₀이라는 것을 확인할 수 있다. PM_{2.5}의 경우 총 미세먼지에서 차지하는 분율은 0.77~0.98

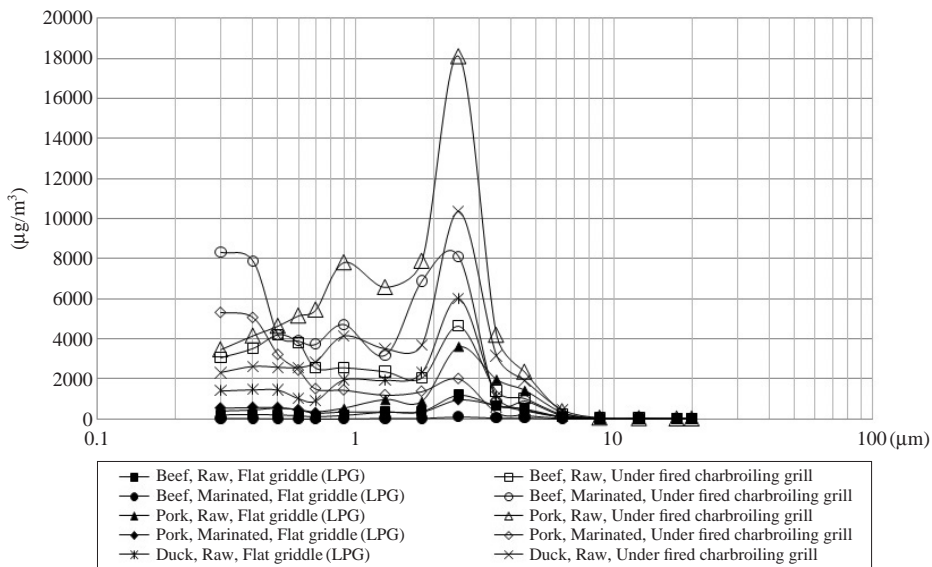


Fig. 3. PM particle size distribution of meat cooking.

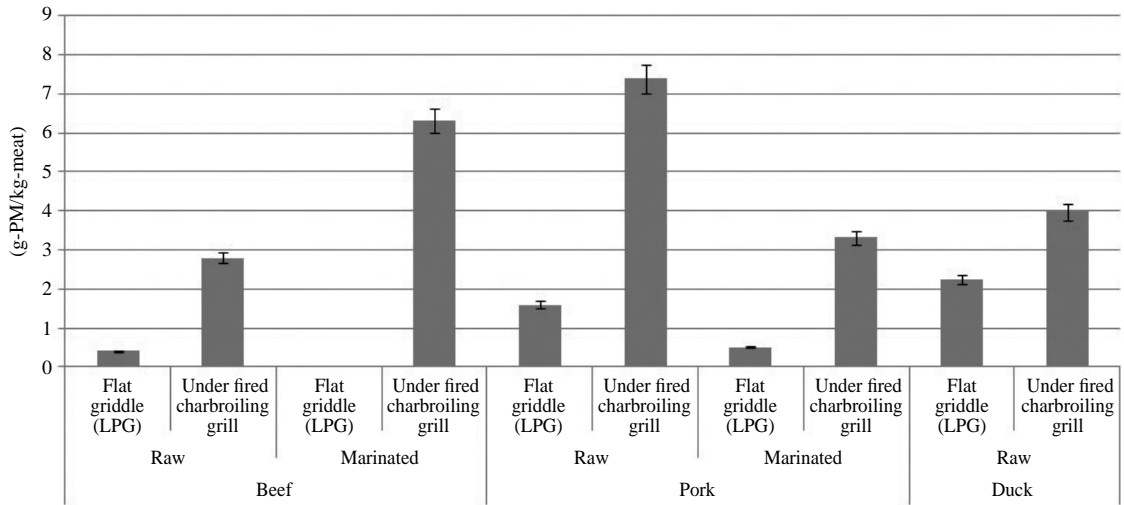


Fig. 4. PM emission factors for commercial meat cooking.

Table 4. PM emission factors for commercial meat cooking.

(unit: g/kg-meat)

Items	Beef				Pork				Duck	
	Raw		Marinated		Raw		Marinated		Raw	Marinated
	Flat griddle (LPG)	Under fired charbroiling grill	Flat griddle (LPG)	Under fired charbroiling grill	Flat griddle (LPG)	Under fired charbroiling grill	Flat griddle (LPG)	Under fired charbroiling grill	Under fired charbroiling grill	Under fired charbroiling grill
Max.	0.52	3.11	N/D	6.48	2.08	8.05	0.53	3.94	2.62	4.05
Min.	0.35	2.52	N/D	6.11	0.97	7.04	0.46	3.00	1.64	3.93
Avg.	0.41	2.79	N/D	6.31	1.60	7.39	0.51	3.32	2.25	3.97
Std.	±0.058034	±0.17258	N/D	±0.107681	±0.33134	±0.329233	±0.022431	±0.31240	±0.308617	±0.038442

Table 5. PM₁₀ and PM_{2.5} mass fraction to total PM concentration.

Items	Beef				Pork				Duck	
	Raw		Marinated		Raw		Marinated		Raw	Marinated
	Flat griddle (LPG)	Under fired charbroiling grill	Flat griddle (LPG)	Under fired charbroiling grill	Flat griddle (LPG)	Under fired charbroiling grill	Flat griddle (LPG)	Under fired charbroiling grill	Under fired charbroiling grill	Under fired charbroiling grill
PM ₁₀ /PM	1.00	1.00	N/D	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00
PM _{2.5} /PM	0.78	0.94	N/D	0.97	0.77	0.93	0.85	0.98	0.94	0.90

Table 6. PM₁₀ and PM_{2.5} emission factors for commercial meat cooking.

(unit: g/kg-meat)

Items	Beef				Pork				Duck	
	Raw		Marinated		Raw		Marinated		Raw	Marinated
	Flat griddle (LPG)	Under fired charbroiling grill	Flat griddle (LPG)	Under fired charbroiling grill	Flat griddle (LPG)	Under fired charbroiling grill	Flat griddle (LPG)	Under fired charbroiling grill	Under fired charbroiling grill	Under fired charbroiling grill
PM ₁₀	0.41	2.79	N/D	6.31	1.60	7.39	0.51	3.32	2.25	3.97
PM _{2.5}	0.32	2.62	N/D	6.12	1.23	6.87	0.43	3.25	2.11	3.59

Table 7. Comparison of emission factors by recent meat cooking studies. (unit: g-PM/kg-meat)

Items	Equipment type (Fuel)	US EPA ¹⁾			SVVAPCD ²⁾ (PM ₁₀)		SCAQMD ³⁾ (PM)	Lee (2010) ⁴⁾ (PM)	Lee <i>et al.</i> (2009) ⁵⁾ (PM)	Lee <i>et al.</i> (2010) ⁶⁾ (PM)	This study (PM)	
		PM	PM ₁₀	PM _{2.5}	PM ₁₀	PM _{2.5}						
Beef	Raw	Flat griddle (LPG)	-	-	-	4.5	3.4	2.8	24.99	-	-	0.4
		Under fired charbroiling grill	8.1	7.5	7.1	15.6	15.2	16.0	30.65	-	3.82	2.8
	Marinated	Flat griddle (LPG)	-	-	-	4.5	3.4	2.8	77.32	-	-	N/D
		Under fired charbroiling grill	9.5	9.2	8.7	15.6	15.2	16.0	113.63	-	-	6.3
Gut of a cattle	Raw	Under fired charbroiling grill	-	-	-	-	-	-	-	6.59	-	
Pork	Raw (belly)	Flat griddle (LPG)	-	-	-	-	-	2.8	173.62	-	-	1.6
		Under fired charbroiling grill	-	-	-	9.5	9.0	16.0	159.54	7.77	4.08	7.4
	Marinated (shoulder)	Flat griddle (LPG)	-	-	-	-	-	2.8	57.46	-	-	0.5
		Under fired charbroiling grill	-	-	-	9.5	9.0	16.0	-	5.24	-	3.3
Chicken	Raw	Flat griddle (Electric)	N/D	N/D	N/D	-	-	-	-	-	-	-
		Under fired charbroiling grill	10.5	10.5	9.9	9.5 (Poultry)	9.0 (Poultry)	-	-	-	8.22	-
Duck	Raw	Under fired charbroiling grill	-	-	-	9.5 (Poultry)	9.0 (Poultry)	-	-	-	-	2.3
		Marinated	Under fired charbroiling grill	-	-	-	9.5 (Poultry)	9.0 (Poultry)	-	-	-	-

Source & Notes ¹⁾US EPA (2002): Source was EPA (1999) and Norbeck (1997), Beef was flank steak, chicken was thigh meat.

²⁾San Joaquin Valley Air Pollution Control District (2009), 690-Commercial Cooking Operations.

³⁾Sacramento Metropolitan Air Quality Management District (2002): Welch and Norbeck, 1998.

⁴⁾Lee (2010): Emission factor was calculated by weight loss of meat cooking.

⁵⁾Lee *et al.* (2009): Model Result of Under fired Charbroiling Cooking using the Hood Method.

⁶⁾Lee *et al.* (2010): Field Test Result of Under fired Charbroiling Cooking Restaurants in Seoul.

정도로 분석되었다. PM_{2.5}/PM 비율은 직화방식의 경우 평균 0.96, 철판방식은 평균 0.80으로 직화방식에 의한 PM_{2.5}의 배출비율이 높은 것으로 나타났다.

Hood Method를 이용하여 개발한 Lee *et al.* (2009)에서도 돼지 삼겹살과 목살의 경우 PM₁₀이 질량농도 기준으로 총 배출된 먼지 중 92.2~99.5%를 차지하는 것으로 나타났고, 1.3~3.5 μm의 입경 범위에서 먼지농도가 높게 나타났으며, 특히, 2.0~2.5 μm의 입경에서 가장 높은 농도를 보였다. 또한, PM_{2.5}/PM₁₀의 비는 0.63~0.79로 서울시 도시 대기의 PM_{2.5}/PM₁₀의 비보다 높은 수치를 보여 PM_{2.5}가 차지하는 비율이

높게 나타남을 언급하였다.

기준에 개발된 국내의 배출계수와 본 실험을 통해 산출된 배출계수를 표 7과 같다. 배출계수 개발을 위한 방법으로 미국 EPA (2002), SVVAPCD (2009), SCAQMD (2002)는 고정 오염원의 배출가스를 희석 공기를 사용하여 일반 대기화하여 측정하는 Dilution chamber method를 적용하였으며, 본 연구와 Lee *et al.* (2009)은 Hood method를 이용한 결과로서 국내에서는 일반적으로 이 Hood method를 적용하였다. Hood method는 고기구이 장치 위에 후드 등을 설치하여 배출가스 중의 먼지를 포집하는 방법으로 Dilution

chamber method보다는 상대적으로 간편한 방법으로 활용되고 있다(BallardTremeer and Jawurek, 1999a, b). 본 연구 결과와 Lee *et al.* (2009)과 서울시내 직화구이 음식점에서 직접 측정하여 개발한 이준복 등(2010)의 조사결과는 모두 미국의 조사결과 보다 약 1/2~1/4 수준 이었으며, 본 연구 결과는 Lee *et al.* (2009)과 이준복 등(2010)의 조사결과 보다 쇠고기 고기구이의 경우는 조금 낮게, 돼지고기 고기구이는 조금 크게 산출되었다. 하지만, 고기 굽기 전·후의 중량 손실을 이용하여 산출한 이미향(2010)의 배출계수가 전체적으로 가장 높은 것으로 나타났다.

본 연구에서 수행한 쇠고기, 돼지, 오리 구이의 생 및 양념구이의 간접적인 열을 이용하여 굽는 철판방식(LPG)과 직접적인 열을 이용하여 굽는 직화방식(숯)의 배출계수는 0.4~7.4 g-PM/kg-meat 범위로 나타났다. 배출계수가 높은 구이 형태는 육류의 종류(쇠고기, 돼지고기)와 생 또는 양념 여부에 관계없이 고기와 열이 직접적으로 접촉하여 굽는 직화방식으로 나타났다. 육류별, 구이형태별 배출계수는 배출량 산정 시 구이용 육류 소비량에 따라 각각 적용한다면, 정확한 미세먼지 배출량을 산정하고, 고기구이에서 배출되는 미세먼지 배출량이 전체적인 도심의 미세먼지 배출 기여도를 파악하는데 활용 될 수 있을 것으로 판단된다. 또한, 육류별, 구이형태별 배출계수는 각 고기구이 음식점의 배출가스 중 유적 및 미세먼지를 제거하기 위한 집진장치의 집진 부하량을 정확하게 예측할 수 있어 여과집진장치 또는 전기집진장치 탈리주기 등의 중요한 설계 인자로 활용할 수 있을 것으로 판단된다.

4. 결 론

본 연구는 국가 배출목록 작성을 위한 신뢰성 높은 배출계수를 개발하고자 하였으며, 현장실험을 통하여 국내 고기구이 음식점의 미세먼지 배출계수를 산출하였다. 실험장치의 구성은 실제 음식점 조건을 고려하여 적용하였으며, 연료와 고기 종류는 설문조사 결과에 따라 가장 많이 사용되는 연료와 소비되는 육류를 적용하여 결정하였으며, 쇠고기, 돼지고기, 오리고기를 구이형태별, 연료에 따른 구이방식별로 미세먼지 배출계수 실험을 실시 하였다. 구이형태의

경우 생구이와 양념구이로 구분하였다. 구이방식은 가스(LPG)의 경우 철판방식으로, 숯의 경우 직화방식으로 실험을 실시하였으며, 다음과 같은 결론을 도출하였다.

- (1) 미세먼지 배출계수 실험 결과 쇠고기의 경우 생구이 철판방식은 0.4 g-PM/kg-meat, 직화방식은 2.8 g-PM/kg-meat로 산출되었으며, 양념구이 직화방식은 6.3 g-PM/kg-meat으로 산출되었다. 돼지고기의 경우 생구이 철판방식은 1.6 g-PM/kg-meat, 직화방식은 7.4 g-PM/kg-meat, 양념구이 철판방식은 0.5 g-PM/kg-meat, 직화방식은 3.3 g-PM/kg-meat으로 산출되었다. 오리고기의 경우 생구이 직화방식은 2.3 g-PM/kg-meat, 양념구이 직화방식은 4.0 g-PM/kg-meat으로 산출되었다. 본 연구에서 수행한 고기구이의 배출계수는 0.4~7.4 g-PM/kg-meat 범위에서 산출되었다. 배출계수가 높은 구이 형태는 육류의 종류(쇠고기, 돼지고기)와 생 또는 양념 여부에 관계없이 고기와 열이 직접적으로 접촉하여 굽는 직화방식으로 나타났다.
- (2) 입경별 질량농도 분포를 적용하여 전체 미세먼지(PM) 중 PM₁₀과 PM_{2.5}의 배출비율을 분석한 결과 배출 PM은 모두 PM₁₀으로 분석되었으며, PM_{2.5}의 경우 직화구이가 평균 0.96, 철판구이가 평균 0.80으로 직화구이에 의한 PM_{2.5}가 더 많이 배출되는 것으로 분석되었다.
- (3) 본 연구에서 개발된 배출계수는 먹기 좋은 상태까지의 굽기를 전제로 하였으며, 실험 장치나 측정기에 별도의 응축기가 갖추어져 있지 않기 때문에 산출된 배출계수는 여과성 PM이다. 따라서 앞으로 본 연구를 바탕으로 응축과정을 통한 응축성 PM을 분석한다면 배출계수는 더 커질 가능성이 있다.
- (4) 육류별, 구이형태별 배출계수는 배출량 산정 시 구이용 육류 소비량에 따라 각각 적용한다면, 정확한 미세먼지 배출량을 산정하고, 고기구이에서 배출되는 미세먼지 배출량이 전체적인 도심의 미세먼지 배출 기여도를 파악하는데 활용 될 수 있을 것으로 판단된다. 또한, 육류별, 구이형태별 배출계수는 각 고기구이 음식점의 배출가스 중 유적 및 미세먼지를 제거하기 위한 집진장치의 집진 부하량을 정확하게 예측할 수 있어 여과집진

장치 또는 전기집진장치 탈리주기 등의 중요한 설계 인자로 활용할 수 있을 것으로 판단된다.

감사의 글

본 연구는 환경부의 2009년 차세대 핵심환경기술 개발사업(031-091-015)의 지원으로 수행되었으며, 이에 감사드립니다.

참 고 문 헌

국립환경과학원(2009) PM_{2.5} 배출특성 및 기여도 추정 연구. 박성규, 최상진, 김진윤, 봉춘근, 박성진, 황의현(2009) 음식점 약취처리장치 중 유적 및 미세먼지 제거에 관한 실험적 연구, 한국대기환경학회 추계학술대회 논문집, 604-605.

월드워치연구소(2009) 기후의 역습, 환경재단 도요새, 87-90.

이미향(2010) 인천지역에서 고기구이에 의한 PM 배출목록 작성에 관한 연구, 인하대학교 석사학위논문.

이준복, 김홍주, 김영호, 조성호, 노영광, 김익수, 김주형, 정권(2010) 서울지역 고기구이 음식점의 미세먼지 배출량 산정, 한국대기환경학회 추계학술대회 논문집, 270.

이효민, 윤은경, 이근영, 조연숙, 홍영근, 김윤희, 나현수, 조문희, 양지선, 양기화(2002) 식품 중 PAHs 화합물의 위해성평가, 식품의약품안전청연구보고서, 6, 329-336.

한국대기환경학회(2007) 대도시 대기질 관리방안 조사연구.

Ballard-Tremeer, G. and H.H. Jawurek (1999a) The "hood method" of measuring emissions of rural cooking devices, Biomass & Bioenergy, 16, 341-345.

Ballard-Tremeer, G. and H.H. Jawurek (1999b) Estimation of

the dilution chamber method for measuring emissions of cooking devices, Biomass & Bioenergy, 17, 481-494.

Lee, J.B., H.J. Kim, K. Jung, and S.D. Kim (2009) Emission characteristics of particulate matters from udder-fired charbroiling cooking process using the hood method, Journal of Environmental Health Science, 35(4), 315-321.

Park, S.K., S.D. Kim, and H.K. Lee (2004) Dispersion characteristics of vehicle emission in an urban street canyon, Science of the Total Environment, 323, 263-271.

Pechan (2003) Method for Developing a National Emission Inventory for Commercial Cooking Processes: Technical Memorandum.

Ramanathan, V. and G. Carmichael (2008) Global and regional climate changes due to black carbon, Nature Geoscience, 1, 221-227.

Sacramento Metropolitan Air Quality Management District (2002) Section XX Miscellaneous Process-Cooking, prepared by Hao Quinn.

San Joaquin Valley, Air Pollution Control District (2009) 2006 Area Source Emissions Inventory Methodology, 690-Commercial Cooking Operations.

U.S. EPA (1997) AP-42 Section 9.5 Introduction to Animal & Meat Products Preparation.

U.S. EPA (2002) 2002 National Emissions Inventory Data & Documentation, Appendix C: Emission factors and county-level activity data used to calculate 2002 emission by category (<http://www.epa.gov/ttn/chieff/net/2002inventory.html>).

U.S. EPA (2010) PM-How Particulate Matter Affects the Way We Live & Breathe (<http://www.epa.gov/oar/particlepollution>).