



논문

# 고기구이 초미세먼지 내 콜레스테롤 및 산화 잠재력과의 관계

## Relationship between Cholesterol and Oxidative Potential from Meat Cooking

이용민, 김은영, 류춘호, 오세호, 주흥수<sup>1)</sup>, 배민석\*

목포대학교 환경공학과, <sup>1)</sup>안양대학교 환경에너지공학과

Yongmin Lee, Eunyoung Kim, Chunho Ryu, Sea-Ho Oh, Hungsoo Joo<sup>1)</sup>, Min-Suk Bae\*

Department of Environmental Engineering, Mokpo National University

<sup>1)</sup>Department of Environmental Engineering, Anyang University

접수일 2018년 10월 5일  
 수정일 2018년 10월 10일  
 채택일 2018년 10월 10일

Received 5 October 2018  
 Revised 10 October 2018  
 Accepted 10 October 2018

\*Corresponding author

Tel : +82-(0)61-450-2485

E-mail : minsbae@mkpo.ac.kr

**Abstract** Identification of the major sources contributing to PM is of importance in order to understand their quantitative contributions to atmosphere. In the viewpoint of the meat cooking in Korea, only a few analyses of organic molecular markers have been conducted due to analytical difficulties. In this study, ten different parts of meat (i.e., blade shoulder, belly, and arm shoulder of pork; ribeye roll, top blade muscle, and short plate of beef; leg quarter, breast, and wing of chicken; duck; mackerel) were pyrolyzed to generate the cooked PM using an electronic heating plate. Generated PM were collected by the pyrolysis sampling system to identify total carbon (TC) using a carbon analyzer and cholesterol using a Liquid chromatography tandem-mass spectrometry (LC-MSMS) based on fragmentor voltage (FV), precursor ion, collision energy, product ion. In addition, oxydative potential (OP) analysis using dithiothreitol (DTT) method were discussed to investigate the toxicity relates. Highly correlated pairwise scatterplots between the cholesterol and TC indicate that oxydative potential was highly associated with different parts of meat. This study provides insight into the meat cooking components of PM, which could be drivers of the oxidative potential relates.

**Key words:** DTT, ROS, Meat cooking, Cholesterol

### 1. 배경

대기 중 초미세먼지(PM<sub>2.5</sub>)의 원인으로는 크게 식생연소, 자동차 배출, 중국발 장거리 물질, 2차 성분으로 이루어져 있다(Oh *et al.*, 2018b, 2017; Park *et al.*, 2016). 최근 연구에 의하면, PM<sub>2.5</sub> 내 음식 조리, 특히 고기구이에서 배출되는 미세먼지가 증가하고 있다(Zhao *et al.*, 2015; Sun *et al.*, 2011; Allan *et al.*, 2010; Schauer *et al.*, 2002). 2014년 미국 내 식당에서 배출되는 초미세먼지 총량은 약 9톤에 달하며, 2023년에는 10톤을 넘어간다는 보고가 있다(Gysel *et al.*,

2018). 이 같은 이유로 고기구이에서 발생하는 유기 성분 분석과 더불어, 관련된 대기 정량적 기여율 분석 및 산화 잠재력과 관련된 독성 연구가 최근 전 세계적으로 활발히 진행되고 있다(Li *et al.*, 2014; Mohr *et al.*, 2012; Robinson *et al.*, 2006). 홍콩 음식 연소 성분 중 formaldehyde, acetaldehyde, benzene과 같은 휘발성 유기화합물이 다량 발생하는 것으로 보고되었고(Huang *et al.*, 2011), 멕시코 음식조리 배출 성분 중 벤젠 화합물을 포함하는 비메탄 휘발성 유기화합물이 다량 발생하며(Mugica *et al.*, 2001), 미국에서는 formaldehyde, acetaldehyde 등이 고기구이 중 발생하

는 것으로 보고되었다. 특히 cholesterol (CAS number: 57-88-5,  $C_{27}H_{46}O$ , (3 $\beta$ )-cholest-5-en-3-ol)은 고기 구이에서 발생하는 대표적인 유기지표 성분으로 알려져 있다(McDonald *et al.*, 2003; Schauer *et al.*, 2002; Schauer *et al.*, 1999).

고기구이가 우리나라 주식단 중의 하나임을 고려할 때, 이와 관련된 초미세먼지의 대기 기여율은 무시할 수 없으며, 관련 연구 또한 매우 미비하다. 미국 등에서 연구된 고기구이에 대한 원인분류표는 조리 방법 및 고기 종류 및 부위가 상이함을 감안할 때, 대기 중 고기구이에 따른 기여율 계산을 위해, 미국 등에서 발표한 동일 원인분류표(source profile)를 이용하기에는 한계가 크다. 이에, 고기구이 등에 따른 국내 대기 기여율을 계산하기 위해서, 우리나라 특성에 맞는 cholesterol과 같은 유기지표 성분 분석 및 더 나아가 독성과 관련된 산화 잠재력 분석은 필수 불가결하다.

본 연구에서는 연소 체임버를 이용하여, 부위별 돼지고기, 소고기, 닭고기 및 고등어 등 총 10종의 고기를 전기구이하여 발생된 초미세먼지를 석영여과지를

이용하여 포집하였다. 포집된 여과지는 열광학 탄소 분석기를 이용하여 총탄소(total carbon, TC) 분석 및 Liquid chromatography tandem-mass spectrometry (LC-MSMS)를 이용하여 cholesterol를 분석하였다. 또한, dithiothreitol (DTT) 분석법을 이용한 고기구이 분진 내 산화 잠재력을 분석하였다. 이에, 1) 고기구이 종류에 따른 TC에 대한 cholesterol 비율 및 2) DTT 분석에 따른 산화 스트레스 잠재력과의 상관성 분석을 통해, 고기 종류에 따른 독성 잠재력을 분석함으로써, 인체 유해성과의 관련성을 분석하였다.

## 2. 연구 방법

### 2.1 고기구이 연소 체임버

본 연구에서는 고기구이 분진 내 존재하는  $PM_{2.5}$ , cholesterol 및 TC 분석을 위해, 연소 체임버를 설계 제작하였다(그림 1). 본 연구에 사용된 연소 체임버는 크게, (1) 질량 유량계에 의한 HEPA 필터 유동 1차 희석기, (2) 내부 팬이 장착된 직경 30 cm 혼합 체임

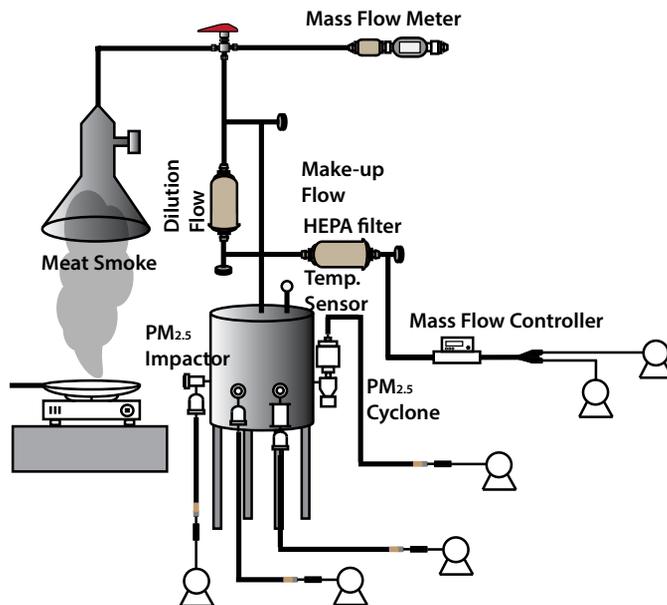


Fig. 1. Schematic diagram of the pyrolysis sampling system from meat smoke.

버, 그리고 (3) 8채널 연소 분진 포집관으로 구성되어 있다. 모든 관은 직경 0.5인치 내열 스테인리스 관으로 구성되어 있으며, 시료 포집 전후로 질량 유량 측정기에 의해, 각 채널 유량 및 총유량을 측정하여, 유량 유실 및 압력 저하를 확인하였다. 본 연구에서는 연소 체임버 내 희석기를 사용하지 않고, 석영필터가 장착된 2개 채널을 이용하였다. 오리피스에 의해 고정 유량 16.7 lpm 하에, PM<sub>2.5</sub> 고기 열분해 분진을 직경 47 mm로 절단된 석영필터(Pallflex, 2500QATUP, Pall Corp., USA)에 의해 포집하였다. 석영필터는 포집 전 450°C에서 최소 12시간 가열된 후, 알루미늄 호일로 내부 포장된 페트리디쉬에 담아 테프론 테이프로 밀봉하여 추출 및 성분 분석 전까지 냉동실(-20°C)에 보관하였다.

1개 채널에 의해 포집된 석영 여과지 포집 시료는 총탄소 분석 후, 잔여 여과지 부분과 다른 채널에 의해 포집된 석영 시료와 혼합하여, cholesterol 농도 측정을 위해 15 mL의 메탄올(HPLC grade, > 99.9%, sigma-aldrich, USA)을 이용하여 추출하였다. 추출은 4°C로 설정된 유체 순환기(CA-111, Eyla, Japen)와 초음파기(8800, Branson, USA)를 이용해 120분 동안 추출하였다. 추출액은 시린지 여과지(PTFE 0.45 µm,

Pall, USA)를 사용하여 불용성 분진을 제거한 후, 최종 시료를 LC-MSMS를 이용하여 시료 내 cholesterol을 분석하였다. 본 연구에 사용된 고기는 무양념 돼지고기(목살(blade shoulder), 삼겹살(belly), 앞다리살(arm shoulder)), 소고기(꽃등심(rib eye roll), 부채살(top blade muscle), 업진살(short plate)), 닭고기(다리(leg quarter), 가슴살(breast), 날개(wing)), 오리고기(duck)의 10종류 고기류 및 고등어(mackerel)를 무연료 전기 후라이팬을 이용하여 연속 3분 간격으로 총 9분간 포집하였다.

## 2.2 Cholesterol 분석

본 연구에서는 LC-MSMS(LC; 1200, tandem-MS; 6100, Agilent Technologies, USA)를 이용하여 열분해한 고기구이 분진 내 존재하는 PM<sub>2.5</sub> cholesterol을 분석하였다(Bae *et al.*, 2017). LC-MSMS는 주입 시료를 atmospheric-pressure chemical ionization (APCI) source(Nagy *et al.*, 2006)를 이용하여, cholesterol 성분을 이온화하고, 고진공 하에 두 직렬 질량 분석기에 의해 질량 파편(m/z)을 선택적 분리하여, 이온 증폭 검출기에 의해 증폭된 질량 이온을 최종 분석한다. 표 1에 cholesterol 분석을 위한 LC-MSMS 분석 조건을 나타냈다. 간략히, 컬럼 온도 21°C 하에 Poroshell 컬럼(Agilent Poroshell 120 EC-C18, Capillary 2.1 × 150 mm 4.0-Micron)을 이용하여, 용리액 acetonitrile (ACN) 및 methanol을 4:1의 비율로, 유량 0.6 mL/min 하에 분석하였다. 이후, 주입온도 325°C에서 60 PSI 압력 하에, 50 µL 주입 시료와 함께 질량 분석기로 주입된다.

표 2 및 그림 2에 cholesterol 최종 검출 질량 이온 및 에너지를 나타냈다. LC-MSMS는 단일 질량 분석기와 다르게 두 번의 연속 질량 파편 분석에 의해, 분석 방해 질량 이온 물질을 제거함으로써 목적 성분만

**Table 1.** Operational conditions of LC-MSMS system.

| Type                    | Condition   |
|-------------------------|---|
| Column                  | Agilent Poroshell 120 EC-C18 (2.1 × 150 mm, 4.0-Micron) |
| Column temp.            | 21°C  |
| Gas temp.               | 325°C   |
| Gas flow                | 4L/min  |
| Nebulizer               | 60 PSI  |
| Capillary               | 4000V   |
| Ion source              | APCI  |
| Time segments scan type | MRM   |
| Time segments polarity  | Positive  |
| Eluent                  | 80 (Acetonitrile):20 (Methanol)                         |
| Solvents flow           | 0.6 mL/min  |
| Injection volume        | 50 µL   |

**Table 2.** Mass fragment ions (m/z) for cholesterol using LC-MSMS.

| Compound    | Molecular weight | Fragmentor voltage (FV) | Precursor ion (m/z) | Collision energy (CE) | Product ion (m/z) |
|-------------|------------------|-------------------------|---------------------|-----------------------|-------------------|
| Cholesterol | 386.65           | 119                     | 369                 | 15                    | 160.9             |

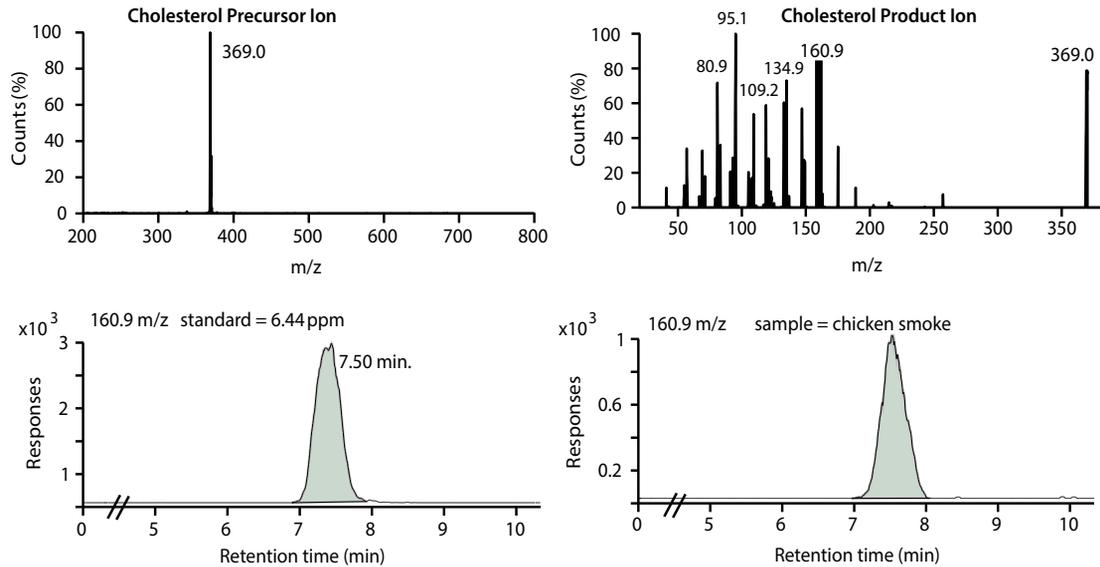


Fig. 2. Mass fragment ions (m/z) of precursor ion (369) and product ion (160.9) for cholesterol using LC-MSMS.

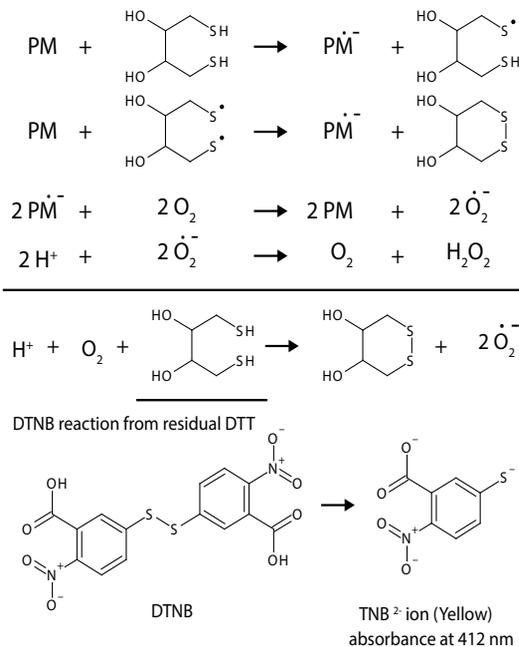


Fig. 3. Chemical loss basis of the dithiothreitol (DTT) assay followed by its reaction with 5,5-dithiobis-(2-nitrobenzoic acid) (DTNB), which is converted to 5-mercapto-2-nitrobenzoic acid for the absorption at 412 nm (Sameenoi *et al.*, 2012; Ayres *et al.*, 2008; Cho *et al.*, 2005).

이 갖는 고유한 생성이온에 대해서 선택적 검출이 가능하다. 각각의 성분마다 높은 감도를 나타내는 (1) Fragmentor Voltage (FV), (2) 전구이온 (m/z) (Precursor Ion), (3) 충돌 에너지 (Collision Energy, CE), 그리고 (4) 생성이온 (m/z) (Product Ion)에 대한 최적 조건을 찾는 것은 대기 시료와 같이 저농도 샘플을 분석하는 데 매우 중요하다. 본 연구에서는 119 FV에 의해 발생한 전구이온 369 m/z를 이용하여, 15 CE에 의한 생성이온 160.9 m/z를 cholesterol (retention time; 7.50분) 정량 분석에 최종 이용하였다.

### 2.3 DTT 분석

열분해 고기구가 분진의 독성 정도를 분석하고자, 산화 잠재력을 분석하는 방법 중 하나인 디티오프라이톨 (dithiothreitol, DTT)을 이용하여 독성 관련성을 시료 간 정량적으로 분석하였다. DTT 법은 비세포 화학 발생 반응 실험으로 시료처리량과 경제적 측면에서 장점이 뛰어나고 (Ayres *et al.*, 2008), 세포 내 산화스트레스 (Li *et al.*, 2002), 병리학적 관련성 (Strak *et al.*, 2017; Bates *et al.*, 2015)이 보고되고 있다. 간략히,

**Table 3.** Analytical dithiothreitol (DTT) compounds for meat smoke.

| Compound  | Concentration |
|---|---------------|
| Potassium phosphate dibasic & Potassium phosphate monobasic | 100 mM        |
| dithiothreitol (DTT)  | 2 mM          |
| Trichloroacetic acid solution                               | 1%            |
| 5,5-Dithiobis(2-nitrobenzoic acid) (DTNB)                   | 2 mM          |
| Tris(hydroxymethyl)amino-methane                            | 0.08 M        |

그림 3에 나타난 바와 같이 산화환원반응인 DTT법은 크게 두 반응으로 구성된다. 첫 번째, PM<sub>2.5</sub> 내 활성산소 관련 성분과 DTT와의 반응, 두 번째, 잔류 DTT의 발색반응이다. 본 반응은 시료 내 활성산소 농도 및 반응 DTT 농도 사이에서, 시간에 따른 반응 속도와 깊은 관련성이 있다. 즉, 시간에 따른 잔류 DTT와 5,5-dithiobis-(2-nitrobenzoic acid) (DTNB)의 반응 생성물인 5-mercapto-2-nitrobenzoic acid (thionitrobenzoate, TNB)를 412 nm 흡광도에서 분석함으로써 시료 내 활성산소의 농도를 간접적으로 분석하는 방법이다. 즉, DTT 흡광도의 빠른 감소율은 포집 시료 내 산화 잠재력 성분이 높게 존재한다는 것을 의미한다.

본 연구에 사용된 반응 시약 명을 표 3에 나타냈다. 간략히, 반응에 필요한 두 용액 (potassium phosphate dibasic & potassium phosphate monobasic (100 mM), trichloroacetic acid solution (1%))과 2 mM DTT, 2 mM DTNB를 이용했으며, DTT 반응종결 시약인 0.08 M tris(hydroxymethyl)amino-methane이 사용되었다. 전체 9.5 mL DTT 분석 혼합액이 반응 시작 후 40분 내에서, 37°C 등온 교반 하에, 총 5회 동안 412 nm 흡광도에서 DTT 감소율과 관련된 최종 산물인 TNB를 분석하였다. 최종 DTT 소비 감소율 (DTT consumption rate (nmol/min))은 다음 식에 의해 산출되었다.

$$\sigma_{\text{DTT}} (\text{nmol/min}) = -\sigma_{\text{ABS}} \times (\text{No}/\text{ABSo}) \quad (1)$$

여기서  $\sigma_{\text{ABS}}$ 는 40분 내 5회(5분, 10분, 20분, 30분, 40분) 분석된 흡광도의 감소 기울기를 나타내며, No는

초기 DTT 농도 및 ABSo는 초기 흡광도 값을 나타낸다. 본 연구에서는 열분해 고기구이 분진 농도와 비교를 위해 포집 부피 농도로 정규화해서 다음 식에 의해 dithiothreitol-oxidative potential (DTT-OP)를 최종 분석하였다.

$$\text{DTT-OP activity (nmol/min)} \\ = (\sigma_{\text{DTTsample}} - \sigma_{\text{DTTblank}}) \quad (2)$$

위 식(2)를 다시 포집 부피 DTT-OP<sub>V</sub> (nmol/min/m<sup>3</sup>) 및 TC 농도 DTT-OP<sub>T</sub> (nmol/min/μgTC)로 정규화하여 식(3)과 (4)를 나타냈다.

$$\text{DTT-OP}_V (\text{nmol/min/m}^3) \\ = (\sigma_{\text{DTTsample}} - \sigma_{\text{DTTblank}})/m^3 \quad (3)$$

$$\text{DTT-OP}_T (\text{nmol/min}/\mu\text{gTC}) \\ = (\sigma_{\text{DTTsample}} - \sigma_{\text{DTTblank}})/\mu\text{gTC} \quad (4)$$

여기서  $\sigma_{\text{DTTblank}}$ 는 같은 조건에서의 바탕 시료의 흡광도 감소 기울기를 나타낸다. 본 연구에서  $\sigma_{\text{DTTblank}}$ 는 81.93 nmol/min로 나타났으며, 시료 흡광 감소 기울기의 상관관계 결정계수의 평균은 0.98로 매우 높게 나타났다.

## 2.4 TC 분석

TC 분석을 위하여 실험실 탄소분석기 (Lab based OCEC Carbon Aerosol Analyzer, Sunset laboratory-Inc., USA)를 이용하였다. 탄소분석기는 National Institute of Occupational Safety & Health (NIOSH 5040) 프로토콜(protocol)을 기초로 한 열광학적 투과도 법을 이용한 분석법이다. 포집한 석영 여과지로부터 0.4418 cm<sup>2</sup> 크기로 절단하여 분석하였으며, 외부 표준시료 및 시료 중 10%를 재차 분석한 결과, 정확도 및 정밀도 모두 5% 오차 내에서 분석되었다. 선행 연구에서, 서로 다른 세 개 프로토콜 (NIOSH5040, Interagency Monitoring of Protected Visual Environments\_A (IMPROVE\_A), European Supersites for Atmospheric Aerosol Research (EUSAAR))을 이용한 TC는 서로 일치하는 것으로 나타났다 (Oh *et al.*,

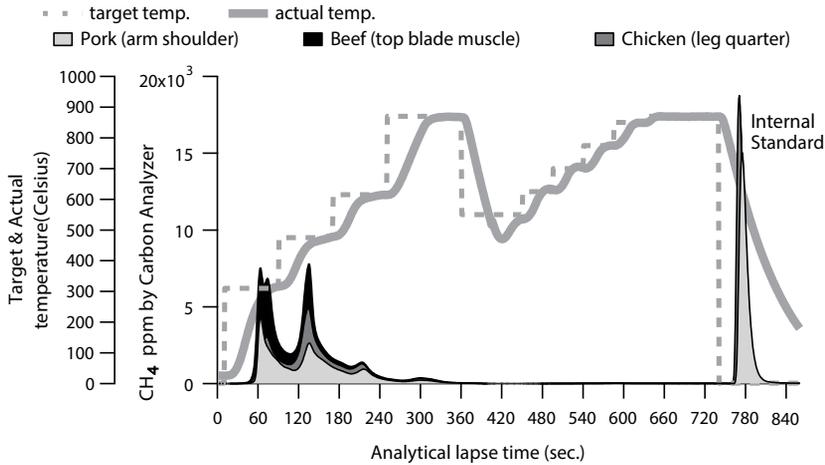


Fig. 4. Carbonaceous thermal distribution for pork (arm shoulder), beef (top blade muscle), and chicken (leg quarter).

Table 4. Analytical results of TC, cholesterol, and ratio of cholesterol from the pyrolysis sampling system from meat smoke.

| Type                                       | Part             | Abbreviation | TC ( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ) | Cholesterol ( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ) | Cholesterol/TC |
|--|------------------|--------------|---------------------------------|--|----------------|
| Pork                                       | Blade shoulder   | Pork BS      | 54,917                          | 1,015                                    | 0.018          |
|  | Belly            | Pork BY      | 50,901                          | 854                                      | 0.017          |
|  | Arm shoulder     | Pork AS      | 14,859                          | 94                                       | 0.006          |
| Beef                                       | Ribeye roll      | Beef RR      | 42,241                          | 702                                      | 0.017          |
|  | Top blade muscle | Beef TB      | 30,795                          | 616                                      | 0.020          |
|  | Short plate      | Beef SP      | 62,438                          | 916                                      | 0.015          |
| Chicken                                    | Leg quarter      | Chicken LQ   | 19,260                          | 273                                      | 0.014          |
|  | Breast           | Chicken BT   | 8,595                           | 23                                       | 0.003          |
|  | Wing             | Chicken WG   | 17,130                          | 388                                      | 0.023          |
| Overall average of port, beef, and chicken |                  |              | 33,460                          | 542                                      | 0.015          |
| Duck                                       | -                | -            | 31,098                          | 504                                      | 0.016          |
| Mackerel                                   | -                | -            | 68,945                          | 1,227                                    | 0.018          |

2018a). 간략히, 승온과정을 거쳐 총탄소를 여과지로 부터 증기화 한 후, 산화, 환원과정을 거쳐 메탄의 양을 불꽃이온화 검출기 (flame ionization detector, FID)로 분석한다. 매 분석 종료 시마다 내부 표준물질 (internal standard)인 메탄가스를 이용하여 최종 분석 농도를 자동으로 보정하였다. 선행 연구 결과에서 고기구이 TC 중 원소탄소 (elemental carbon, EC)는 매우 낮고, 유기탄소 (organic carbon, OC)가 대부분을 차지하는 것으로 보고되었다 (Heo *et al.*, 2016; Kang *et al.*, 2014; Seo *et al.*, 2014, 2010; Schauer *et al.*, 1999). 그림 4에 탄소분석기에 의해 분석된 돼지고기

(앞다리살), 소고기 (부채살), 닭고기 (다리) 구이의 열광학 분포를 나타낸 것이다. 분석 중 산소 주입조건에서 EC의 FID 면적은 거의 분석되지 않았다. 이에, 본 연구에서는 OC 및 EC를 분리하지 않고, TC 분석 농도를 cholesterol 및 DTT와 함께 비교 분석하였다.

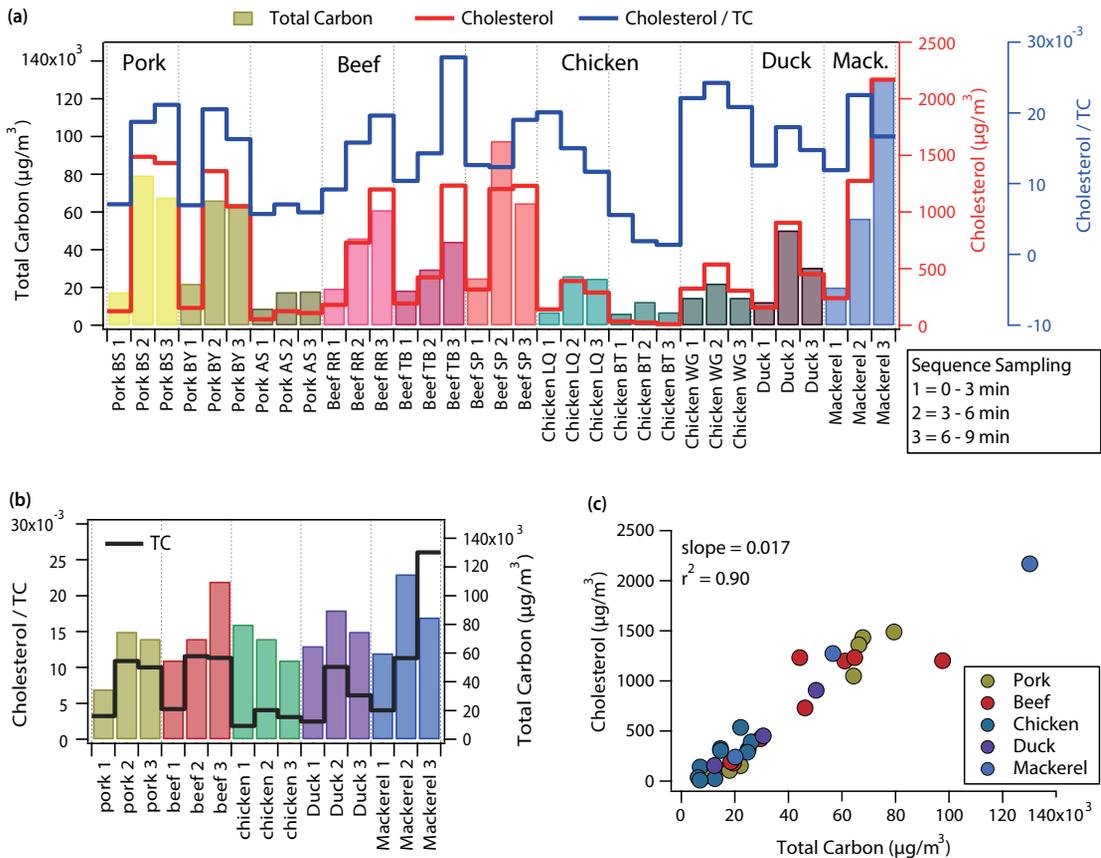
### 3. 결 과

서로 다른 3 부위별 돼지고기, 소고기, 닭고기와 오리고기 및 고등어를 무연료 전기 후라이팬에서 열분

해하여 발생된 분진을 연소 챔버를 이용하여, 3분 간격 총 9분간 포집하여, 총 33개 시료에 대해 TC 및 cholesterol 분석 결과를 표 4에 요약하였다. 본 연구에서 나타낸 데이터는 모두 최저 저한계 이상 값을 나타냈으며, 재차 및 표준시료에 대해서 5% 이내 정확 정밀도를 나타냈다. 본 연구에서 고기구이 시 발생하는 모든 분진이 챔버 후드로 포집되지 않음을 가정할 때, 부피농도 환산 값을 고기구이 분진 배출 절대량으로 판정할 수 없지만, 같은 조건에서 실험이 진행되었음을 볼 때 상대 농도 값은 의미가 있다.

돼지고기 중 목살의 TC는  $54,917 \mu\text{g}/\text{m}^3$  및 cholesterol  $1,015 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 로 분석되어 다른 돼지고기 부위보다 가장 높은 값을 나타냈으며. 다음으로 삼겹살 및

앞다리살로 나타났다. 전체 돼지고기 TC 및 cholesterol 평균값은  $40,226 \mu\text{g}/\text{m}^3$  및  $654 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 로 분석되었다. 앞서 설명한 바와 같이 고기구이 시 유실 분진이 있으므로, 고기별 구이 분진 발생 특성을 분석하고자 cholesterol와 TC의 비율을 계산하였다. 돼지고기의 경우 앞다리살이 가장 작은 비율 값(0.006)을 나타냈으며, 목살과 삼겹살은 비슷하게 분석되었다. 이는 돼지고기 구이 시 목살 및 삼겹살에서 상대적으로 많은 TC 발생과 함께, 높은 cholesterol이 발생하였다. 소고기의 경우 꽃등심, 부채살, 업진살 중에서 업진살이 가장 높은 TC ( $62,438 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ) 및 cholesterol ( $916 \mu\text{g}/\text{m}^3$ )로 분석되었다. 하지만, 부채살의 경우 가장 높은 cholesterol과 TC의 비율(0.020)을 나타내, 단위



**Fig. 5.** Results of TC, cholesterol, and ratio of cholesterol concentrations in the sequence sampling time (1=0~3 min, 2=3~6 min, 3=6~9 min) and pairwise scatterplot between cholesterol & TC from the pyrolysis sampling system from meat smoke.

TC 당 높은 cholesterol을 발생하였다. 닭고기는 닭다리 구이에서 가장 높은 TC ( $19,260 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ), 닭날개 구이에서 가장 높은 cholesterol ( $388 \mu\text{g}/\text{m}^3$ )을 나타냈으며, 특히 전체 고기구이에서 가장 높은 cholesterol과 TC 비율(0.023)을 나타냈다. 전체 돼지고기, 소고기, 닭고기의 평균 TC 및 cholesterol은  $33,460 \mu\text{g}/\text{m}^3$  및  $542 \mu\text{g}/\text{m}^3$ , cholesterol와 TC 비율 0.015로 분석되었다. 이는 오리고기의 TC ( $31,098 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ) 및 cholesterol ( $504 \mu\text{g}/\text{m}^3$ )와 비슷한 값으로 분석되었다. 특이한 점은 고등어 구이의 경우 TC ( $68,945 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ) 및 cholesterol ( $1,227 \mu\text{g}/\text{m}^3$ )이 고기구이보다 약 2배 이상 높은 값을 나타내었다. 이는 생선 비늘이 상대적으로 열분해가 잘 되어, 다량의 유기 성분이 배출될 가능성이 크다.

좀 더 자세히, 본 연구에서 각 3분 간격 구이 시간별 TC, cholesterol 농도 및 cholesterol과 TC 비율을 그림 5에 나타냈다. 모든 돼지고기 목살, 삼겹살, 앞다리살 구이에서 3분에서 6분 구이 시간 동안 가장 높은 TC ( $54,467 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ) 및 cholesterol ( $991 \mu\text{g}/\text{m}^3$ )이 분석되었다. 이는 구이 초반, 돼지고기 내 수분 등이 선증발되고, 이후 고기가 열분해되어 cholesterol을 포함하는 유기 성분이 발생하며, 6분 이후 발생량이 서서히 감소하는 것으로 판단한다. 닭고기, 오리고기 구이에서 3분에서 6분 사이에 가장 높은 TC 및 chole-

sterol 농도가 나타났다. 하지만, 소고기의 경우 꽃등심, 부채살의 경우 6분에서 9분 구이 시간 동안 가장 높은 TC 및 cholesterol이 분석되었다. 이는 고기를 구성하고 있는 단백질 성분 등의 열분해 특성이 다른 고기류에 비해 느리게 나타남을 알 수 있다.

Cholesterol과 TC 평균 비율을 살펴보면, 돼지고기의 경우 3분에서 6분 구이 시간 동안 가장 높은 비율을 나타낸 반면, 소고기의 경우 6분에서 9분 구이 시간에 가장 높은 값(0.022)을 나타내, 앞서 설명한 느린 열분해에 따른 cholesterol 배출량 특성을 나타냈다. 닭고기의 경우, 소고기와는 반대로 처음 구이 시작에서 3분 동안 가장 높은 비율(0.016)을 나타내, 다른 고기류에 비해 짧은 열분해 유기성분 발생이 일어남을 알 수 있다. 오리고기 및 고등어의 경우 돼지고기와 동일하게 3분에서 6분 구이 시간 동안 가장 높은 비율을 나타냈다.

전체적인 cholesterol과 TC의 상관관계를 살펴보면, 높은 상관관계 결정계수( $r^2=0.90$ ) 기울기 0.017로 나타났다. 본 연구 결과를 바탕으로 다음과 같은 식(5)을 산출하였다.

$$TC_{meat\ cooking} = \frac{TC_{meat\ cooking}}{Cholesterol_{meat\ cooking}} \times Cholesterol \quad (5)$$

위 식(5)를 통해 TC 내 고기구이에 의해 대기 중

**Table 5.** Analytical results of volume normalized DTT-OP and TC mass normalized DTT-OP from the pyrolysis sampling system from meat smoke.

| Type     | Part             | Abbreviation | Volume normalized DTT-OP <sub>v</sub><br>(nmol/min/m <sup>3</sup> ) | TC mass normalized DTT-OP <sub>T</sub><br>(nmol/min/ $\mu\text{gTC}$ ) |
|----------|------------------|--------------|---|--|
| Pork     | Blade shoulder   | Pork BS      | 107   | 0.0015   |
|          | Belly            | Pork BY      | 152   | 0.0023   |
|          | Arm shoulder     | Pork AS      | 101   | 0.0059   |
| Beef     | Ribeye roll      | Beef RR      | 107   | 0.0034   |
|          | Top blade muscle | Beef TB      | 88  | 0.0023   |
|          | Short plate      | Beef SP      | 336   | 0.0052   |
| Chicken  | Leg quarter      | Chicken LQ   | 142   | 0.0055   |
|          | Breast           | Chicken BT   | 202   | 0.0237   |
|          | Wing             | Chicken WG   | 32  | 0.0022   |
| Duck     | -                | -            | 126   | 0.0033   |
| Mackerel | -                | -            | 227   | 0.0025   |

기여량( $TC_{meat\ cooking}$ )을 계산할 수 있다.  $TC_{meat\ cooking} / Cholesterol_{meat\ cooking}$ 는 본 구이 실험에서 연구 결과의 cholesterol과 TC의 기울기는 0.017의 역수 값인 58.8이다.

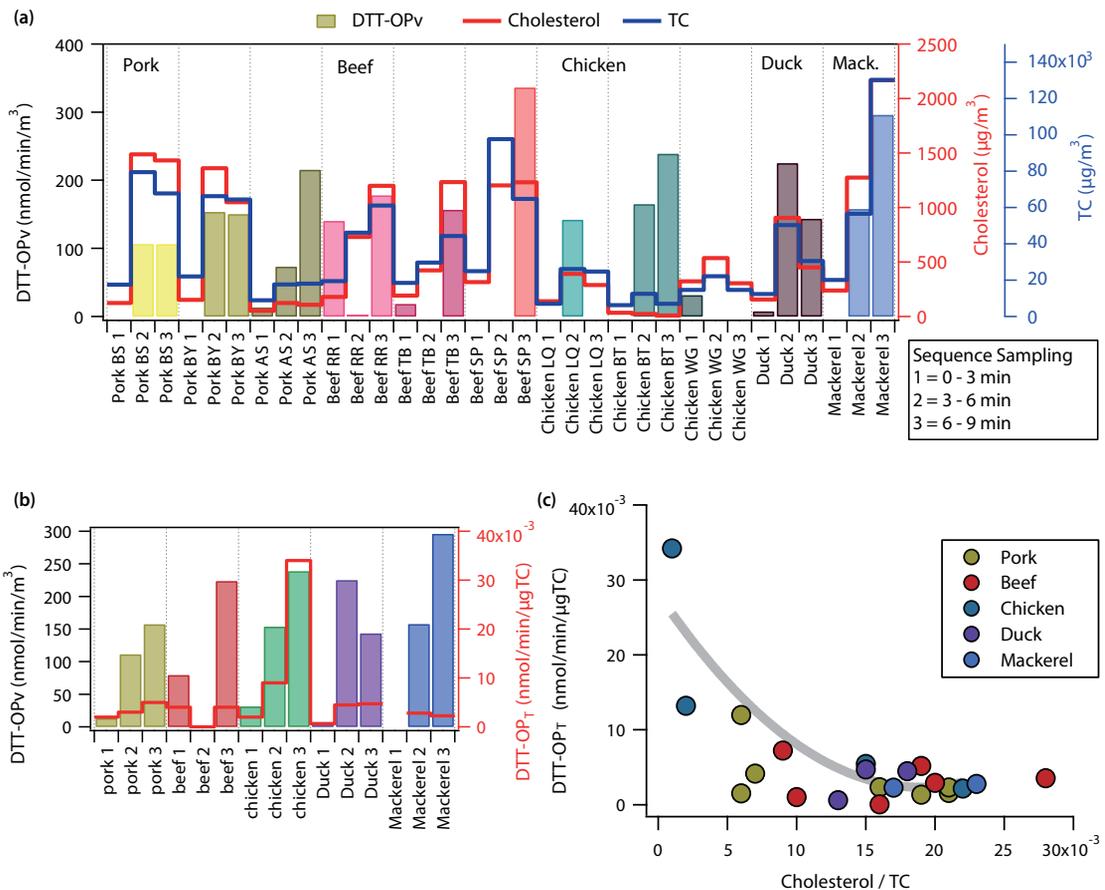
$$TC_{NMC} = TC_T - TC_{meat\ cooking} \quad (6)$$

식(5)로부터 산출된  $TC_{meat\ cooking}$ 와 대기 중 전체  $TC_T$ 의 차이로 식(6)에 나타난 비고기구이 TC ( $TC_{NMC}$ ) 기여량을 최종 산출할 수 있다. 이는, 대기 TC 내, 2차 생성물 및 다른 1차 원인에 대한 정량적 기여량 등을 연구하는 데 매우 유용하다.

고기구이 분진의 산화 잠재력을 DTT 실험을 통해

분석한 DTT-OP 결과를 표 5에 나타냈다. 본 DTT 분석에서 바탕 시료를 측정 값에서 식(2)를 통해서 보정했으며, 바탕 값보다 낮은 값은, 본 결과에서 모두 제외하였다. DTT-OP는 크게 포집 부피로 정규화한 값(volume normalized DTT-OP<sub>v</sub> (nmol/min/m<sup>3</sup>))과 분석 TC로 정규화한 값(TC mass normalized DTT-OP<sub>T</sub> (nmol/min/μgTC))으로 계산하였다.

그 결과, 돼지고기 DTT-OP<sub>T</sub>는 앞다리살의 경우 단위 TC 배출량에서 가장 높은 값(0.0059)을 나타냈다. 이는 다른 목살(0.0015) 및 삼겹살(0.0023) 구이에서 보다 높은 산화 잠재력을 지닌 성분이 앞다리살 구이 분진 내 존재할 가능성이 크며, 이에 따른 인체 유해



**Fig. 6.** Results of DTT-OP in the sequence sampling time (1 = 0~3 min, 2 = 3~6 min, 3 = 6~9 min) and pairwise scatterplot between DTT-OP and TC from the pyrolysis sampling system from meat smoke.

성도 상대적으로 높게 나타날 수 있다. 소고기의 경우 업진살에서 가장 높은 DTT-OP<sub>T</sub>(0.0052)가 분석되었으며, 꽃등심보다 1.5배, 부채살보다 2.3배 높게 나타났다. 닭고기의 경우 닭가슴살의 DTT-OP<sub>T</sub>가 0.0237로 닭날개 구이보다 약 10배 이상 매우 높게 나타났다. 오리 구이 DTT-OP<sub>T</sub>의 경우 0.0033으로 나타났다. 고등어 DTT-OP<sub>T</sub>는 0.0025로 돼지고기, 소고기, 닭고기 전체 평균 값보다 낮게 나타났다. 이는 발생 TC가 다른 고기구이 분진보다는 높게 나타났지만, 분진 내 산화 잠재력을 지닌 성분은 상대적으로 적게 존재함을 의미하며, 이에 따른 인체 유해성도 낮게 평가될 수 있다. 본 연구 결과로 최근 이슈화가 된, 국내 고등어구이 미세먼지 발생량에 따른 유해성 평가의 재고가 반드시 필요하다고 판단한다.

마지막으로, 본 연구에서 각 3분 간격 구이 시간별 DTT-OP<sub>V</sub> 및 DTT-OP<sub>T</sub>를 그림 6에 나타냈다. 돼지고기(목살, 삼겹살, 앞다리살) 모든 구이에서 6분에서 9분 구이 시간 동안 가장 높은 DTT-OP<sub>T</sub>(0.0053)가 나타났다. 이는 앞서 설명한 처음 구이 시 돼지고기 내 수분 등 선 증발, 이후 cholesterol을 포함하는 유기 성분이 발생하며, 6분 이후 BC 및 활성산소를 포함하는 불완전 연소 성분 등에 의한 산화 잠재력 증가에 따른 결과라 판단한다. 이는 닭가슴살 구이의 경우 같은 경향으로 분명하게 나타났다. 소고기의 경우 돼지고기와는 다르게 처음 시작에서 3분까지, 6분에서 9분 사이에 높은 DTT-OP<sub>T</sub>가 나타났다. 위 고기구이의 배출 성분 특성과 DTT-OP<sub>T</sub>의 특이한 점은 TC와 cholesterol의 비율이 낮을수록 높은 DTT-OP<sub>T</sub>가 분석되었다. 이를 그림 6(c)에 DTT-OP<sub>T</sub>와 cholesterol/TC의 상관관계를 나타냈다. 이는 TC로 정규화한 성분 중, cholesterol이 상대적으로 많이 존재하면, 활성산소를 포함하는 산화 잠재력이 상대적으로 낮으며, 반대로 cholesterol이 상대적으로 적게 존재하면, 높은 DTT-OP<sub>T</sub>가 분석되어 산화 잠재력이 상대적으로 크게 나타났다. 이는, 고기구이 시간별 열분해에 따른 연소 성분이 다르게 나타나며, 산화 잠재력과 깊은 관련성이 있음을 의미한다.

#### 4. 결 론

연소 체임버를 이용하여, 부위별 소고기, 돼지고기, 닭고기 및 고등어 등 10종의 고기를 열분해 발생 분진을 TC, cholesterol, 그리고 DTT 분석법을 이용하여 산화 잠재력을 통해, 고기구이 종류에 따른 TC에 대한 cholesterol 비율 및 독성 잠재력을 분석하였다. 그 결과, 전체적인 cholesterol과 TC의 높은 상관관계 결정계수( $r^2=0.90$ )와 함께 기울기 0.017로부터 비고기구이 TC(TC<sub>NMC</sub>) 기여량을 최종 산출할 수 있다. 또한, 닭가슴살의 DTT-OP<sub>T</sub>가 0.0237로 매우 높게 나타났다. 고등어 DTT-OP<sub>T</sub>는 0.0025로 돼지고기, 소고기, 닭고기 전체 평균값보다 낮게 나타났다. 마지막으로, TC 내 cholesterol의 비율이 낮을수록 높은 DTT-OP<sub>T</sub>가 분석되어, 고기구이 시간별 열분해에 따른 불완전 연소 성분이 산화 잠재력과 관련성이 있다.

#### 감사의 글

본 논문은 정부의 재원으로 한국연구재단(NRF-2017R1D1A1B03029517 및 NRF-2017M3D8A109222)의 지원을 받아 수행된 연구 결과입니다.

#### References

- Allan, J.D., Williams, P.I., Morgan, W.T., Martin, C.L., Flynn, M.J., Lee, J., Nemitz, E., Phillips, G.J., Gallagher, M.W., Coe, H. (2010) Contributions from transport, solid fuel burning and cooking to primary organic aerosols in two UK cities, *Atmospheric Chemistry and Physics*, 10(2), 647-668.
- Ayres, J.G., Borm, P., Cassee, F.R., Castranova, V., Donaldson, K., Ghio, A., Harrison, R.M., Hider, R., Kelly, F., Kooter, I.M., Marano, F., Maynard, R.L., Mudway, I., Nel, A., Sioutas, C., Smith, S., Baeza-Squiban, A., Cho, A., Duggan, S., Froines, J. (2008) Evaluating the Toxicity of Airborne Particulate Matter and Nanoparticles by

- Measuring Oxidative Stress Potential – A Workshop Report and Consensus Statement, *Inhalation Toxicology*, 20(1), 75-99.
- Bae, M.-S., Park, D.-J., Lee, K.-H., Cho, S.-S., Lee, K.-Y., Park, K. (2017) Determination of Analytical Approach for Ambient PM<sub>2.5</sub> Free Amino Acids using LC-MSMS, *Journal of Korean Society for Atmospheric Environment*, 33(1), 54-63. (in Korean with English abstract)
- Bates, J.T., Weber, R.J., Abrams, J., Verma, V., Fang, T., Klein, M., Strickland, M.J., Sarnat, S.E., Chang, H.H., Mulholland, J.A., Tolbert, P.E., Russell, A.G. (2015) Reactive Oxygen Species Generation Linked to Sources of Atmospheric Particulate Matter and Cardiorespiratory Effects, *Environmental Science & Technology*, 49(22), 13605-13612.
- Cho, A.K., Sioutas, C., Miguel, A.H., Kumagai, Y., Schmitz, D.A., Singh, M., Eiguren-Fernandez, A., Froines, J.R. (2005) Redox activity of airborne particulate matter at different sites in the Los Angeles Basin, *Environmental Research*, 99(1), 40-47.
- Gysel, N., Welch, W.A., Chen, C.-L., Dixit, P., Cocker, D.R., Karavalakis, G. (2018) Particulate matter emissions and gaseous air toxic pollutants from commercial meat cooking operations, *Journal of Environmental Sciences*, 65, 162-170.
- Heo, S.-H., Kim, J.-H., Jo, M.-R., Hong, J.-H., Kang, D.-I. (2016) A Study on the Emission Characteristics of Hazardous Air Pollutants (HAPs) and Particulate Matters from Under-Fired Briquette (Yeontan) Broiling, *Journal of the Korean Society of Urban Environment*, 16(2), 169-178. (in Korean with English abstract)
- Huang, Y., Ho, S.S.H., Ho, K.F., Lee, S.C., Yu, J.Z., Louie, P.K.K. (2011) Characteristics and health impacts of VOCs and carbonyls associated with residential cooking activities in Hong Kong, *Journal of Hazardous Materials*, 186(1), 344-351.
- Kang, B.-W., Jeon, J.-M., Lee, H.S. (2014) A Study on the Source Profile Development for Fine Particles (PM<sub>2.5</sub>) Emitted from Meat Cooking, *Journal of Korean Society for Atmospheric Environment*, 30(1), 18-25. (in Korean with English abstract)
- Li, N., Bhattacharya, P., Karavalakis, G., Williams, K., Gysel, N., Rivera-Rios, N. (2014) Emissions from commercial-grade charbroiling meat operations induce oxidative stress and inflammatory responses in human bronchial epithelial cells, *Toxicology Reports*, 1, 802-811.
- Li, N., Sioutas, C., Cho, A., Schmitz, D., Misra, C., Sempf, J., Wang, M., Oberley, T., Froines, J., Nel, A. (2002) Ultrafine Particulate Pollutants Induce Oxidative Stress and Mitochondrial Damage, *Environmental Health Perspectives*, 111(4), 455-460.
- McDonald, J.D., Zielinska, B., Fujita, E.M., Sagebiel, J.C., Chow, J.C., Watson, J.G. (2003) Emissions from Charbroiling and Grilling of Chicken and Beef, *Journal of the Air & Waste Management Association*, 53(2), 185-194.
- Mohr, C., DeCarlo, P.F., Heringa, M.F., Chirico, R., Slowik, J.G., Richter, R., Reche, C., Alastuey, A., Querol, X., Seco, R., Peñuelas, J., Jiménez, J.L., Crippa, M., Zimmermann, R., Baltensperger, U., Prévôt, A.S.H. (2012) Identification and quantification of organic aerosol from cooking and other sources in Barcelona using aerosol mass spectrometer data, *Atmospheric Chemistry and Physics*, 12(4), 1649-1665.
- Mugica, V., Vega, E., Chow, J., Reyes, E., Sánchez, G., Arriaga, J., Egami, R., Watson, J. (2001) Speciated non-methane organic compounds emissions from food cooking in Mexico, *Atmospheric Environment*, 35(10), 1729-1734.
- Nagy, K., Jakab, A., Pollreis, F., Bongiorno, D., Ceraulo, L., Averna, M.R., Noto, D., Vékey, K. (2006) Analysis of sterols by high-performance liquid chromatography/mass spectrometry combined with chemometrics, *Rapid Communications in Mass Spectrometry*, 20(16), 2433-2440.
- Oh, S.-H., Park, D., Cho, J.-H., Han, Y.-J., Bae, M.-S. (2018a) Inter-comparison of Carbonaceous Analytical Results using NIOSH5040, IMPROVE\_A, EUSAAR2 Protocols, *Journal of Korean Society for Atmospheric Environment*, 34(3), 447-456. (in Korean with English abstract)
- Oh, S.-H., Park, E.-H., Yi, S.-M., Shon, Z.-H., Park, K., Bae, M.-S. (2018b) Contribution of Biomass Burning and Secondary Organic Carbon to Water Soluble Organic Carbon at a Suburban Site, *Journal of Korean Society for Atmospheric Environment*, 34(2), 259-268. (in Korean with English abstract)
- Oh, S.-H., Kim, J., Shon, Z.-H., Bae, M.-S. (2017) Assessing the Altitudinal Potential Source Contribution Function of Aerosol Optical Depth in the West Coast of Korean Peninsula during the DRAGON-KORUS-AQ Campaign, *Journal of Korean Society for Atmospheric Environment*, 33(1), 19-30. (in Korean with English abstract)
- Park, D.-J., Cho, I.-H., Lee, K.-Y., Park, K., Lee, Y.-J., Ahn, J.-Y., Bae, M.-S. (2016) Analysis of Poly Aromatic Hydrocarbon (PAH) Pollutants Originated from Local Road Dust by Spatial Measurements, *Journal of Korean Society*

- for Atmospheric Environment, 32(3), 272-279. (in Korean with English abstract)
- Robinson, A.L., Subramanian, R., Donahue, N.M., Bernardo-Bricker, A., Rogge, W.F. (2006) Source Apportionment of Molecular Markers and Organic Aerosol. 3. Food Cooking Emissions, *Environmental Science & Technology*, 40(24), 7820-7827.
- Sameenoi, Y., Koehler, K., Shapiro, J., Boonsong, K., Sun, Y., Collett, J., Volckens, J., Henry, C.S. (2012) Microfluidic Electrochemical Sensor for On-Line Monitoring of Aerosol Oxidative Activity, *Journal of the American Chemical Society*, 134(25), 10562-10568.
- Schauer, J.J., Kleeman, M.J., Cass, G.R., Simoneit, B.R.T. (2002) Measurement of Emissions from Air Pollution Sources. 4. C<sub>1</sub>-C<sub>27</sub> Organic Compounds from Cooking with Seed Oils, *Environmental Science & Technology*, 36(4), 567-575.
- Schauer, J.J., Kleeman, M.J., Cass, G.R., Simoneit, B.R.T. (1999) Measurement of Emissions from Air Pollution Sources. 1. C<sub>1</sub> through C<sub>29</sub> Organic Compounds from Meat Charbroiling, *Environmental Science & Technology*, 33(10), 1566-1577.
- Seo, Y.-H., Jang, Y.-K. (2014) CMB Source profile of PM<sub>10</sub> emitted upon meat and pork charbroiling, *Journal of Korean Society of Environmental Administration*, 20(2), 49-55. (in Korean with English abstract)
- Seo, Y.-H., Ko, K.-Y., Jang, Y.-K. (2010) Determination of Cholesterol, Fatty Acids and Polyaromatic Hydrocarbons in PM<sub>10</sub> Particles Collected from Meat Charbroiling, *Journal of Korean Society of Environmental Engineers*, 32(2), 155-164. (in Korean with English abstract)
- Strak, M., Janssen, N., Beelen, R., Schmitz, O., Vaartjes, I., Karsenberg, D., van den Brink, C., Bots, M.L., Dijkstra, M., Brunekreef, B., Hoek, G. (2017) Long-term exposure to particulate matter, NO<sub>2</sub> and the oxidative potential of particulates and diabetes prevalence in a large national health survey, *Environment International*, 108, 228-236.
- Sun, Y.-L., Zhang, Q., Schwab, J.J., Demerjian, K.L., Chen, W.-N., Bae, M.-S., Hung, H.-M., Hogrefe, O., Frank, B., Rattigan, O.V., Lin, Y.-C. (2011) Characterization of the sources and processes of organic and inorganic aerosols in New York city with a high-resolution time-of-flight aerosol mass spectrometer, *Atmospheric Chemistry and Physics*, 11(4), 1581-1602.
- Zhao, X., Hu, Q., Wang, X., Ding, X., He, Q., Zhang, Z., Shen, R., Lü, S., Liu, T., Fu, X., Chen, L. (2015) Composition profiles of organic aerosols from Chinese residential cooking: case study in urban Guangzhou, south China, *Journal of Atmospheric Chemistry*, 72(1), 1-18.

## Authors Information

- 이용민 (목포대학교 환경공학과 석사과정 연구원)  
 김은영 (목포대학교 환경공학과 석사과정 연구원)  
 류춘호 (목포대학교 환경공학과 학사과정 연구원)  
 오세호 (목포대학교 환경공학과 석사과정 연구원)  
 주흥수 (안양대학교 환경에너지공학과 교수)  
 배민석 (목포대학교 환경공학과 교수)