Journal of the Korean Society of
Tobacco Science Vol. 30, No. 1, 50~55 (2008)
Printed in Republic of Korea

◀ 총 설 ▶

담배 에어로졸 및 연소패턴

오 인 혁
KT&G 중앙연구원
(2008년 6월 4일 접수)

Aerosol and Combustion Pattern of Tobacco

In Hyeog Oh
KT&G Central Research Institute
(Received June 4, 2008)

1. 에어로졸

에어로졸 연구는 여러 가지 분야에서 이루어져 오다가 1971년도에 Gesellschaft fuer Aerosolforschung (GAeF, Association for Aerosol Research), 1981년도에 American Association for Aerosol Research (AAAR)의 탄생과 동시에 새로운 이론 분야로서 자리를 잡았다. 담배 에어로졸 분야는 Tobacco Chemists' Research Conference와 CORESTA 모임 및 Tobacco Science, Beitrage zur Tabakforschung, Journal of Aerosol Science 및 Chemical Research in Toxicology와 같은 전문 저널들을 통해서 담배 및 에어로졸 관련 학자들에 의하여 논의되어 왔다. 최근에 와서는 담배 에어로졸 중에 포함되어 있는 니코틴이 흡연자의 체내에서 흡입되는 메카니즘 연구와 관련하여 그 기초연구로서 에어로졸 연구가 활발하게 진행되고 있다 (Lipowicz and Piade, 2004, Pankow, 2001, Pankow *et al.*, 2003).

담배 연기는 기체와 부유하는 입자 물질로 구성된 에어로졸이다. 입자들은 대부분 광범위한 응축 유기 성분을 포함하는 액적이라고 할 수 있다. 연기 중의 각 성분들은 기상과 입자상으로 분리되며 항상 기상/입자상 간에 평형을 유지하려고 한다. 담배 연기를 흡입하였을 때 니코틴과 같은 성분은 네 가지 다른 메카니즘에 의하여 호흡 경로 (Respiratory Tract, RT) 중에 침착된다. (1) 흡입된 연기 중의 초기 기상 성분들이 직접 침착 (Direct Gas Deposition, DGD); (2) 입자상의 성분들이 기상으로 증발한 후 침착되는 증발 기체 침착(Evaporative Gas Deposition, EGD); (3) 침착된 입자로 부터 증발된 기상이 침착되는 입자 침착 (Particle Deposition with Evaporation, PDE); (4) RT 조직으로 확산에 의한 입자 침착(Particle Deposition with Diffusion, PDD). 이들 메카니즘 중 3가지(DGD, EGD와 PDE)는 입자상으로부터 휘발을 포함하고 있다. 그러므로 모든 메카니즘에 대한 상대적인 중요도는 각 성분의 증기압과 기상/입자상 분리계수(K_p)의 조합과 같아 대부분 입자상으로부터 각 성분의 휘발도에 의하여 영향을 받는다. Benzo[a]pyrene과 같은 비휘발성 성분은 오직 PDD만이 중요한 메카니즘으로 작용한다. 니코틴과 같은 반 휘발성(semivolatile) 성분은 네 가지 메카니즘 모두가 중요하다. 니코틴을 포함한 담배 연기

*연락저자 : 305-805 대전광역시 유성구 신성동 302 번지, KT&G 중앙연구원
*Corresponding author : *KT&G Central Research Institute, 302 Shinseong-dong, Yuseong-gu, Daejeon 305-805, Korea (phone: 82-42-866-5609; fax: 82-42-866-5544; e-mail: ihoh@ktng.com)*

중 알카로이드는 자유 염기 형태로뿐만 아니라 양성자화 하여 존재할 수 있기 때문에 입자 중 중성 자유 염기성 형태의 분율(α_{fb})은 네 가지 메카니즘들의 상대적 중요도를 결정하는데 중요하며 pH에 의하여 영향을 받는다. DGD와 EGD의 중요도를 표현할 수 있는 식들이 개발되었다. 담배 연기 입자 중 니코틴에 대한 α_{fb}는 입자상의 유효 pH(pH_{eff})에 의하여 결정된다. 역사적으로 "연기 pH"를 측정하는 주요 방법으로는 pH 전극을 연기에 직접 노출하였다. 이 방식은 pH_{eff}나 α_{fb}에 대한 직접적인 설명을 주지 못하는데 그 이유로는 (1) 전극으로 연기 입자상 pH를 측정하는데 따른 문제점과 (2) 그 자체로서 담배 연기 입자의 pH 측정은 니코틴 분포에 대한 양성자화 한 자유 염기 니코틴의 입자상 활동도 계수 효과에 대해서 아무런 정보를 줄 수 없기 때문이다. 직접 pH 전극 방식에 의해 측정된 담배 "연기 pH"의 전형적인 "산" 도는 신뢰도가 떨어지고 양성자화 한 자유 염기 형태의 입자상 니코틴 상대 분포를 결정하는데도 유용하지 않다. 담배 연기 입자로부터 니코틴 휘발도 의존성 α_{fb}를 denuder tube 포집기에 의하여 담배 연기의 평형 상태에서 기체/입자 분포로 측정하면 연기의 니코틴 K_p에 대한 정보를 얻을 수 있다 (Pankow, 2001).

일반적으로 문헌을 통해 담배 주류연 중에 니코틴 대부분은 입자상으로 존재하는 것으로 알려져 있다. 니코틴은 연기 중에 양자화 되거나 자유 염기 형태인데 오직 자유 염기 형태의 니코틴만이 연기 입자상에서 에어로졸의 기상으로 증발하여 기상 니코틴이 급속히 RT 상에 침착하기 때문에 니코틴 침착 속도와 그 양은 α_{fb}에 의존하게 된다. 일반적인 관점에서 담배 주류연 중에는 거의 자유 염기 니코틴을 포함하지 않으므로 흡연가는 대부분의 니코틴을 침착된 입자로부터 흡수하게 된다. 이전 문헌상의 담배 연기 pH는 5.3이므로 자유 염기 니코틴은 거의 존재하지 않는 것으로 알려져 있었다. 1994년도의 담배 회사 내부 문건을 통해 알려진 바에 따르면 담배 연기 중 pH는 약 6.0이었다. 특정 담배의 주류연 입자상에 대한 평형 니코틴 α_{fb}를 결정하기 위하여 휘발도를 이용하여 측정하였다. 특정 브랜드를 갖는 상용 담배의 입자상 pH_{eff}는 6.0-7.8 (니코틴 α_{fb}=0.01-0.36) 범위이었으며, 모든 담배에 있어서 pH_{eff}가 5.3 보다는 컸으며 대부분이 6.0 이상이었다 (Pankow *et al.*, 2003).

담배 연기 중의 니코틴이 denuder 튜브 내에서 어떻게 증발하고 침착하는 가에 대한 새로운 이론이 개발되었으며, Lipowicz and Piade (2004)는 그 이론을 denuder 튜브 실험에 적용하였다. 그리고 그들은 denuder 튜브 내 모든 위치에서 기체-입자는 평형을 이루며 헨리 법칙을 따르는 특수한 경우에 denuder 튜브 내의 침착 현상을 지배하는 미분 방정식을 해석적으로 풀어내었다. 이처럼 평형 상태로 가정함이 유효한지를 확인할 수 있는 기준이 제시되었고 담배 연기중의 니코틴의 경우는 만족할 만한 수준이었다. 이론을 실험 결과에 적용하여 denuder 튜브 내의 침착 형태를 예측한 결과 대부분의 니코틴 침착은 증발에 기인하며 초기에 기상으로 존재하는 니코틴은 약 0.1 %이었다 (Lipowicz and Piade, 2004).

환경 담배 연기(ETS)가 인체의 호흡 기도와 같은 습한 조건 하에서 수분을 흡수하는 정도에 대한 본격적인 연구는 거의 이루어지 않았다. 흡기 및 배기 중 ETS의 입자 크기와 농도 연구를 통하여 호흡 기도를 통과하는 동안 입자 크기 분포가 변하지 않음을 보여 주었다. 따라서 담배 연기는 흡습성이 아니며, 습한 조건의 호흡 기도 내에서 유의할 만한 수준의 입자 성장은 없었다 (Morawska et al, 1998).

인체 기도 중에 담배 연기 입자들(Cigarette Smoke Particle, CSP)의 침착에 관한 실험적 측정치는 입자 크기에 따른 전형적인 침착 자료와 일치하지 않는 결과를 보여 주었다. 흡습성 성장과 관련된 연구 결과는 흡습도가 이러한 차이를 단독으로 보상할 수 없음을 나타내고 있다. 본 연구는 가능한 모델로서 다분산-하전 에어로졸로 모델링 된 CSP 응축에 관한 것이다. 그 결과 CSP를 단분산이나 다분산-비하전 에어로졸로 취급한 것 보다 주류연 CSP 응축을 보다 잘 예측할 수 있었다. Boltzmann 평형에 따르는 초기 하전 분포도를 갖는 에어로졸은 주류연 CSP의 다분산-하전 모델보다 약간 큰 응축 속도를 나타내었다. 수치 결과로서 10^6 개/cm^3의 농도를 갖는 부류연 CSP의 입자

크기와 하전 분포는 안정됨을 보여주었다. 2초 후 10^9 개/cm^3의 농도를 갖는 주류연 CSP의 크기 분포는 납작해지고 넓어지는 반면 보다 큰 쪽으로 이동함을 보여 주었다. 평균 질량 직경은 0.29 μm에서 0.5 μm로 증가하였다. 수치 결과로서 주류연 CSP의 실험 보고서는 하전된 입자수가 시간 경과에 따라 증가함을 나타내었고 응축 초기에는 입자당 하전량은 입자 크기에 근거하여 예측할 수 없음을 확연히 보여 주었다. 구강 내에서 2초 후에 응축되는 경우 다분산-하전 CSP 정보로서는 관측된 CSP 침착량 별 크기 분포를 생성할 수 없었다. 하지만 궁극적인 연구 대상인 기도 내를 이동하는 CSP에서는 추가적인 응축이 발생할 것이다 (Robinson and Yu, 1999).

20-30대 연령에 있는 비흡연자 14명의 호흡기도 내에서 디젤과 가솔린 연기, 그리고 ETS의 총 침착량을 실험적으로 구하였다. 측정 범위가 0.016-0.626 μm인 SMPS (Scanning Mobility Particle Sizer)를 이용하여 10분 동안 편안한 코 호흡 시 흡기와 배기 에어로졸 특성을 구명하였다. ETS, 디젤과 가솔린은 각각 0.183 μm (1.7), 0.125 μm (1.7)와 0.069 μm (1.7)의 average count median diameter (geometric standard deviation) 값을 보여 주었다. ETS의 평균 총 침착 개수는 36 % (표준편차 10 %)이었고, 디젤 연기는 30 % (표준편차 9 %), 그리고 가솔린은 41 % (표준편차 8 %)이었다. 세 가지 종류의 에어로졸에 있어서 입자 크기에 따른 침착 형태 분석은 대부분 (14 중의 12)이 유의성 있는 차이를 보여 주지 않았다. 이는 중요한 점으로 침착 형태 차이가 대상의 내부 변이 (입자크기 분포)와는 관련이 없었다 (Morawska et al., 2005).

상용화된 LED (Light Emitting Diode)와 phototransistor array를 Walton Horizontal Smoking Machine(WHSM) 동물 흡입 노출계에서 담배 연기의 분석과 감지에 적용하여 보았다. 그 장치의 다이오드 단위체는 담배 연기 에어로졸 내로 빛을 방출하고 연기 입자에 의하여 후방 산란된 빛이 phototransistor 단위체에 의하여 감지되었다. 센서는 array 가장 가까운 지점에서 연기 입자의 연속적이며 거의 순간적인 그래픽 구현을 제공한다. 실험 결과로 연기 입자 농도가 거의 센서 신호에 거의 선형적으로 상관이 있었고 연기 성분과는 별개이었다. 연기의 숙성(aging)에 따른 연기 입자의 응집 효과는 관측 가능하였지만 센서 반응에는 미약한 변화를 주었다 (Higgins, 1978).

담배 연기 입자 크기에 따른 희석과 여과 효과를 평가하기 위하여 cyanoacrylate 고정 기법을 궐련에서 방출되는 연기에 직접 적용하였다. 희석되지 않은 본래 연기 중에는 0.1 μm보다 작은 직경의 입자가 상당히 많았고 0.5 μm보다 큰 입자는 상대적으로 적었다. 막궐련의 중간 흡입에서는 중간 및 질량 평균은 각각 0.2와 0.32 μm이었다. 실험적인 한 방법론으로서 방출되는 연기 흐름 안에 곧장 cyanoacrylate 증기를 주입하여 막 필터로 일정한 입자 시료를 포집하고 각 입자의 크기에 따라 분리하고 계수하기 위하여 영상 분석기를 사용하였다. 희석되지 않은 연기를 1.4 초 동안 숙성하면 근본적으로 개수와 질량 중간 평균은 2배로 증가하고 응집 이론에 따라 입자 농도는 감소하였다. 막궐련 상의 흡입 횟수에 따라 크기 분포와 입자 농도에는 거의 영향이 없었다. 필터의 부착으로 인해 보다 큰 입자와 작은 입자 모두가 제거되었으나 분포에 있어서는 작은 입자 쪽으로 치우치는 결과를 초래하였다. 여과된 연기 중의 입자 농도 감소는 니코틴 감소로부터 예측할 수 있었다. 필터 희석은 크기 분포를 보다 큰 쪽으로 기울게 하였으나 궐련부의 희석은 거의 영향을 미치지 않았다. 입자 농도는 전체 희석 수준과 고도의 상관관계가 있었다 (Keith, 1982).

여러 가지 희석율을 갖는 담배 주류연 중에 니코틴 비를 조사하였는데 초기에 총 가용 증기상은 (0.5±0.3) %와 (0.7±0.4) %이었으며 cm^3 당 평균 입자 농도는 $(3.8\pm0.6)\times10^7$과 $(1.2\pm0.1)\times10^9$이었다. 총 니코틴 중에 입자로부터 기체로 증발되는 최대 비율은 상기 각 농도에서 (21±5) %에서 (4±3) %로 감소하였다. 이는 평형 상태로의 경향과 증발을 재평가하기 위해서는 더 많은 희석이 필요함을 암시한다. 흡연 횟수 당 35 cm^3의 담배 주류연을 상자 안으로 넣어 주는 실험에서 입자로부터 증발하는 니코틴의 양은 흡연 당 초기 입자 개수 농도가 증가함에 따라 직선적으로 같이 증가하였다. 그러

나 cm^3 당 초기 입자 농도는 $(2\pm1)\times10^7$에 근접함에 따라 주류연 입자로부터 증발하는 니코틴 양도 수렴함으로서 제한적인 영향을 미침을 알 수 있었다 (Lewis *et al.*, 1995).

2. 연소 패턴

흡연 시 담배 각초 층의 연소 메카니즘에 대하여 알아보기 위하여 연소선과 이웃하는 구역 내 연소 속도 변화를 화로 내에 충전된 각초 층의 역연소 모델을 이용하여 알아보는 실험적인 연구가 모색되었다. 각초 층 내의 온도 측정을 통해 연소 속도를 계산하였고 그 결과 연소 속도는 각폭과 충전밀도의 증가 및 공기 유속의 감소에 따라 감소함을 알 수 있었다. 연소 속도 상의 차이를 구별하기 위하여 각초 층의 유효 직경과 유효 표면적을 이용하여 각초 층 내 산소 전달 계수를 구하였다. 흡연 시에 궐련의 중량 감소는 각초 층의 산소 전달 계수가 증가함에 따라 커짐을 알 수 있었다 (Nagao *et al.*, 2005). 그러므로 여러 가지 궐련의 물리성 중에서도 궐련 내 각초의 겉보기 밀도나 공극률은 중요한 특성으로서 그동안 대부분 수은법을 이용하여 측정하여왔으나 최근에 Oh et al. (2001 and 2007)이 궐련의 흡인저항을 측정하여 계산할 수 있게 하는 수학적 모델식을 개발하여 간편하며 정확하게 측정할 수 있게 되었다.

연소 중인 궐련 탄의 온도를 측정하기 위하여 열화상 분석기 (Thermal Imaging Camera)를 사용하며 정확한 온도를 얻기 위해서는 흑체를 기준으로 하여 보정해 주어야 하는데 일반적으로 카메라 방사율은 0.87 정도로 알려져 있다. 필터를 부착하지 않은 단엽과 배합 궐련 탄의 표면 평균 최고 온도 사이에는 큰 차이가 존재하지 않았다. 이 때 두 종류 탄의 평균 최고 온도는 584±15℃이었다. 그리고 열전대를 사용하여 연소 중인 단엽 궐련 탄 중심부의 피크 온도를 측정하였는데 그 결과로 736-744℃이었다. 열화상 분석기를 이용하여 측정한 결과는 721-748℃이었다. 결과적으로 탄 내부의 기상 온도와 재 밑의 고상 온도는 잘 일치하였는데 이는 열적으로 평형을 이루고 있음을 알 수 있었다. 적절한 교정을 받은 열화상 측정법은 궐련 탄 온도를 측정하는데 열전대 사용법의 좋은 대안으로 여겨진다 (Perfetti et al., 2003).

2초간 일정하게 빨아들이는 단일 흡입 시 위치별 열 발생량을 결정하기 위하여 연소 중인 궐련 내부의 전이 온도 분포를 측정하였다. 열 발생량의 계산은 오직 수직으로 위치한 궐련에만 적용되었는데 고상 온도는 광섬유 탐침을 갖는 적외선 온도 측정기로, 기상 온도는 열전대를 사용하였다. 연소 중인 궐련 내부의 위치별 열 발생속도는 열 수지식을 근거로 한 온도 분포 곡선을 이용하여 구하였다. 열 발생은 연소선 뒤쪽 2-3 mm 범위 안에 집중되어 있으며 흡입 초기에 최대 열 발생 속도를 보였고 중간 비정상 상태의 간격 사이에 급격히 감소하였으며 정상 상태의 열 발생은 후반기에 나타났다. 비정상 상태에서는 궐련지 특성뿐만 아니라 흡입 부피에 의하여 열발생 속도가 영향을 받았다. 비정상 상태에서의 열 발생량은 흡입 부피 및 궐련지 무게와 관계없이 총량의 절반 이상 이었다 (Nagao *et al.*, 2005).

궐련 연소 메카니즘과 연기 생성 과정을 규명하기 위하여 궐련 연소 외부 공기의 흐름에 대한 연구가 필요하다. 이때의 공기 흐름은 추적 입자로서 올리브 기름 방울을 이용하여 입자 영상 유속계 (Particle Image Velocimetry)로 측정하였다. 그 결과 궐련 연소 부위로는 거의 공기 유입이 없는 반면 궐련지 연소선 (char line)을 중심으로 ±2 mm 영역에 집중되었다. 궐련지의 중량은 이러한 현상에 영향을 미치지 않았고 흡입 속도에 따라서 (2.5 부터 35 mL/s) 궐련지 연소선 쪽으로 공기 흐름이 보다 밀집되었으며 그에 비례하여 최대 유속도 증가하는 경향을 보여 주었다 (Nagao et al., 2004).

Muramatsu *et al.*, (1979)은 자연 연소 (naturally smoldering)하는 궐련의 온도, 밀도 및 성분 분포와 변화를 시뮬레이션하기 위하여 1차원 수학 모델링을 전개하였는데 이는 궐련 연소 현상의 수학적 모델의 고전으로 여겨지고 있다. 이를 응용하여 Oh *et al.*, (1998)은 Fortran을 이용하여 코딩 후 시뮬레이션을 수행하였다. 최근에 Oh와 Jheong (2004)는 궐련내의 수분이 확산되는 현상을 수학적으로 모델링하여 제품 궐련의 품질인자로서 수분에 영향을 주는 주요 인자를 밝혀내었다.

궐련의 자연 연소하는 메카니즘을 표현하기 위한 Muramatsu *et al.* (1979)의 수학적 모델과 최근 다른 저자들에 의하여 작성된 새로운 수학적 모델들이 개발되고 있다. 궐련 연소 과정의 모델링을 처음으로 시도한 뒤 40년 이상이 되었다. 궐련 연소 메카니즘을 연구하는 수단으로 여겨졌던 모델링 작업이 지난 40년간 어느 정도 진전이 있었다 할지라도 발표된 거의 모든 수학적 모델들은 자연 대류나 일정한 흡인 조건하에서의 궐련 연소로 국한되었다. 그러나 간헐적 흡인 주기 조건하에서 궐련 내에서 일어나는 과정을 묘사할 수 있는 현실적인 모델은 아직 나타나지 않고 있다 (Muramatsu, 2005).

Eitzinger와 Pirker (2005)는 연소 중인 궐련 내외부의 압력, 유속, 온도와 기체 농도를 예측할 수 있는 수학적 모델을 유도하였다. 이는 담배 입자들에서 발생하는 화학반응에 대한 이산(discrete) 모델과 흐름에 대한 연속-기계적 모델로 구성된다. 궐련 모델은 전산 유체역학(Computational Fluid Dynamics, CFD) 방식에 의하여 수직 위치에서의 궐련을 모사하였다. 계산된 온도 및 기체 농도 분포는 자연 연소, 흡입 연소 및 연속 흡입 시 문헌상 측정치와 비교하여 보았다. 온도장과 연소 속도와 같은 열적 물리 상수들에 있어서 실험값과 잘 일치함을 보여 주었다. 반응 모델이 너무 단순함에도 불구하고 기체 농도 분포의 측정치와 비교하여 허용한계 내에서 잘 일치함을 보여 주었다. 그 결과들은 전산 모사에서 궐련 주변을 포함하는 것이 중요함을 보여 주었다.

두 번째로 발화 강도 시험 예 중에 매체 위에서 연소나 자연 연소 시 모두 수평 위치에 있는 궐련을 전산 모사하였다. 궐련 외부의 흐름 형태나 주변과 매체로의 열 흐름에 대한 두 연소 형태에서의 정량적인 차이에 대한 결과를 나타내었다.

제안된 모델은 두 가지 주요 장점을 제공한다. 먼저 온도장이나 연소 속도와 같은 궐련 연소 시 측정할 수 있는 자료의 입력이 필요 없다는 점이다. 두 번째로 이 모델에 있어서 자연 연소, 흡입과 연속 흡인과 같은 모든 연소 형태에 수학적 모델이나 그 변수들의 변경 없이 바로 모사할 수 있었으며 단지 경계 조건들은 적합화 하였다 (Eitzinger and Pirker, 2005).

생물자원 (biomass)의 연소에 대한 수학적 모델링을 구하기 위해서는 열분해 및 연소와 관련한 정확한 열역학적 지식과 신뢰성 있는 실험적 자료가 필수 불가결하다. 담배 열분해와 연소에 대한 열역학적 변수는 기존 문헌 값들을 인용하였고 흡입 궐련의 온도-시간 변화는 기존 실험값들을 사용하였다. 궐련의 3차원 모델은 질량 및 운동량 보존 원리를 이용하여 얻었다. 흡입 궐련의 수치 모사는 기존의 담배 열분해와 연소에 대한 열역학적 자료와 시간-온도 변화를 이용하여 수행하였다. 그 결과 각 흡입마다 주류연 중의 CO, CO_2와 O_2의 수율과 생성 속도 예측 값이 측정값과 잘 일치하였다 (Hajaligol, 2004).

참 고 문 헌

Eitzinger, B. and Pirker, P. (2005) Numerical Simulation of a Cigarette during Smoking. *Beiträge zur Tabakforschung International* 21: 402-416.

Hajaligol, M. R., Saidi, M. S. and Rasouli, F. (2004) Numerical Simulation of a Burning Cigarette during Puffing. *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis* 72: 141-152.

Higgins, C. E., Gayle, T. M. and Stokely, J. R. (1978) Sensor for Detection of Tobacco Smoke Particulates in Inhalation Exposure Systems. *Beiträge zur Tabakforschung International* 9: 185-189.

Keith, C. H. (1982) Particle Size Studies on Tobacco Smoke. *Beiträge zur Tabakforschung International* 11: 123-131.

Lewis, D. A., Colbeck, I. and Mariner, D. C. (1995) Dilution of Mainstream Tobacco Smoke and Its Effects upon the Evaporation and Diffusion of Nicotine. *Journal of Aerosol Science* 26: 841-846.

Lipowicz, P. J. and Piade J. J. (2004) Evaporation and subsequent deposition of

nicotine from mainstream cigarette smoke in a denuder tube. *Journal of Aerosol Science* 35: 33-45.

Morawska, L., Barron, W., Hitchins, J. and Ristovski, Z. (1998) The Hygroscopic Growth of Polydisperse Salt, Organic And Environmental Tobacco Smoke Aerosols for Different Residence Times. *Journal of Aerosol Science* 29: 279-280.

Morawska, L., Hofmann, W., Hitchins-Loveday, J., Swanson, C. and Mengersen, K.. (2005) Experimental study of the deposition of combustion aerosols in the human respiratory tract. *Journal of Aerosol Science* 36: 939-957.

Muramatsu, M., Umemura, S. and Okada, K. (1979) A mathematical model of evaporation-pyrolysis processes inside a naturally smoldering cigarette. *Combust. Flame* 36: 245-262.

Muramatsu, M. (2005) An Approach to Modelling a Burning Cigarette. *Beiträge zur Tabakforschung International* 21: 286-293.

Nagao, A., Miura, K., Kitao, S. and Horio, M. (2004) Measurement of Air Flow Outside a Burning Cigarette during a Puff using Particle Image Velocimetry. *Beiträge zur Tabakforschung International* 21: 216-222.

Nagao, A., Yamada, Y., Miura, K. and Horio, M. (2005) A Profile of the Heat Generation Inside a Cigarette During Puffing. *Beiträge zur Tabakforschung International* 21: 294-302.

Nagao, A., Yamada, Y., Miura, K. and Horio, M. (2005) Evaluation of Combustion of a Shredded Tobacco Bed Using a Reactor to Produce Reverse Smolder: Influence of Properties Related to Mass Transfer on Combustion of the Bed. *Beiträge zur Tabakforschung International* 21: 350-357.

Oh, I. H., Kim, K. H. and Jheong, G. R.. (1998) Simulation of Physical Chemistry Phenomena Inside a Naturally Smoldering Cigarette. *Journal of the Korean Society of Tobacco Science* 20: 87-98.

Oh, I. H., Jo, S. H. and Rhim, K. S. (2001) A New Method for Determining the Apparent Density of Shred and Void Fraction in a Tobacco Column. *Transactions of the ASAE* 44: 651-654.

Oh, I. H. and Jheong, G. R. (2004) Diffusion of Moisture in a Cigarette Tobacco Column at Room Conditions. *Beiträge zur Tabakforschung International* 21: 15-24.

Oh, I. H., Jeh, B. K., Ra, D. Y., Kwak, D. K., Kim, B. K., Jo, S. H. and Rhee M. S. (2007) Measurement of the Apparent Density of Shred and Void Fraction in a Tobacco Column. *Journal of the Korean Society of Tobacco Science* 29: 23-29.

Pankow, J. F. (2001) A Consideration of the Role of Gas/Particle Partitioning in the Deposition of Nicotine and Other Tobacco Smoke Compounds in the Respiratory Tract. *Chemical Research in Toxicology*. 14: 1465-1481.

Pankow, J. F., Tavakoli, A. D., Luo, W. and Isabelle, L. M. (2003) Particulate Matter of Selected Commercial and Reference Cigarettes. *Chemical Research in Toxicology*. 16: 1014-1018.

Perfetti, T. A., Lyman, C. S. and Morgan, W. T. (2003) Thermal Emissivity and Cigarette Coal Temperature During Smolder. *Beiträge zur Tabakforschung International* 20: 381-388.

Robinson, R. J. and Yu, C. P. (1999) Coagulation of Cigarette Smoke Particles. *Journal of Aerosol Science* 30: 533-548.