

## 재료품 품질의 변동이 필터 공기회석을 변동에 미치는 영향

김정열\* · 김종열 · 신창호 · 정한주

한국인삼연초연구원  
(2000년 12월 4일 접수)

### The Effects of Cigarette Component Variability on Filter Ventilation Variability by Monte Carlo Analysis.

Chung Ryul Kim\*, Jong Yeol Kim, Chang Ho Shin, and Han Joo Chung

*Korea Ginseng and Tobacco Research Institute*

*(Received December 4, 2000)*

**ABSTRACT :** The variability of a ventilated filter cigarette depends on the details of its construction and on the variabilities of its components. Variations in filter ventilation arise from many sources, including variations in tobacco rod pressure drop, filter tip pressure drop, tipping paper permeability, and plugwrap permeability. To reduce the filter ventilation variability, the variability of filter ventilation levels in ventilated cigarettes is studied by Monte Carlo Analysis. For each trials a value is selected for tobacco rod pressure drop, filter tip pressure drop, tipping paper permeability, and plugwrap permeability. These values are selected randomly from a normal distribution based on the target and coefficient of variation for each input variable. The results of this analysis for filter ventilation variation suggest that the variations of filter ventilation are dependent on the details of cigarette designs studied and reducing the variability of any cigarette component will reduce filter ventilation variability. For typical cigarettes, variation in the permeability of tipping paper is usually the most significant contributor to filter ventilation variability. Results of a Monte Carlo Analysis could provide both general insights and specific practical guidance about the design of ventilated filter cigarettes.

**Key words :** Tobacco rod pressure drop, filter tip pressure drop, tipping paper permeability, and plugwrap permeability, filter ventilation, Monte Carlo Analysis

1950년대 필터담배가 개발된 후 담배시장에서의 점유율은 지속적으로 증가하여 현재는 세계 담배시장의 90% 이상을 차지하고 있으며, 필터에 일정한 크기의 구멍을 낸 천공 필터담배의

개발은 담배연기 유해론의 확산과 담배연기 성분 이행량의 저니코틴, 저탈화의 가속화에 힘입어 최근에는 시판되는 담배 중 대부분을 차지하고 있다.

---

\*연락처 : 305-345 대전광역시 유성구 신성동 302번지 번지 한국인삼연초연구원

\*Corresponding author : *Korea Ginseng and Tobacco Research Institute, 302 Shinseong-Dong, Yusong-Ku, Taejeon, 305-345, Korea*

이와 같이 담배산업의 지속적 노력에도 불구하고 담배의 유해론은 전세계적으로 확대되어 각국 정부는 PL법을 제정하여 더욱 더 담배산업을 압박하고 있다. PL법이 시행된다면 담배산업은 지금보다 더 제품담배의 품질에 관심을 갖지 않으면 안된다. 담배 포장지에 표시한 담배연기 이행량(탈, 니코틴 등)에 대해서 일정 범위 이상을 초과하는 제품을 제조하여 판매할 때는 소비자 또는 정부로부터 제재를 받게 될 수 있으므로 품질관리를 강화시켜 균일한 품질의 제품담배를 생산하여 애연가에게 공급해야 한다.

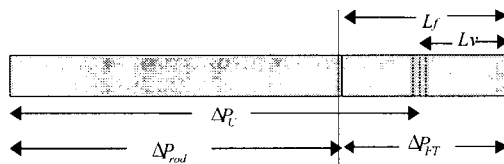
제품담배의 품질을 평가하는 대표적 지표인 담배연기 성분의 이행에 미치는 요인 등을 살펴보면, 여러 가지 복잡한 요인들(Markus Voges, 1998; Selke W. A., 1978)이 있으나 각초인 원료 잎담배의 균일성, 필터의 연기성분 여과능 그리고 천공에 의한 공기회석율로 구분할 수 있다. 원료 잎담배 배합이 균일하다면 이행되는 연기 성분중 탈 및 니코틴 등은 공기회석율에 의존한다. 그러므로 공기회석율의 변동율을 감소시킴으로써 제품담배의 품질 균일화를 기할 수 있을 것이다. 그러나 공기회석에 관하여는 많은 연구가 이루어져서 왔으며, 제품담배 설계를 위한 담배 재료품들의 특성에 따른 공기회석율을 예측

할 수 있는 수학적 모델식들이 Dwyer R. W. 등 (1987) 및 Nicholas Baskevitch(1995)에 의하여 연구 발표되었지만, 재료품 품질변동이 제품담배 공기회석율 변동에 미치는 영향에 관한 연구는 Rasmussen의 연구(1996,1997) 외에 제대로 이루어지고 있지 않다. 만일, 담배를 구성하는 모든 특성을 정확히 알 수 있다면 재료품 품질 특성에 따른 공기회석율 변동은 쉽게 밝혀질 수 있을 것이다. 그러나 실제에 있어서는 어떤 특성을 갖는 재료품에 의해서 제품담배가 만들어졌는지 알 수 없기 때문에 본 연구에서는 공기회석율과 담배 구성원인 재료품과의 상관성을 나타내 주는 수학적 모델식을 확립하여 Monte Carlo 시뮬레이션에 의하여 재료품 품질 변동이 제품담배 공기회석율 변동에 미치는 영향을 연구하였다.

## 재료 및 방법

### 공기회석율에 대한 수학적 모델

필터 공기회석율은 필터의 천공을 통해 들어와 담배를 빠져나가는 총 공기 흐름의 저항이라고 볼 수 있다. 또 공기회석율에 대한 수학적 모델은 담배를 사용하거나 실험할 때 팁페이퍼 기공도 ( $\alpha_{TP}$ ), 필터천지 기공도 ( $\alpha_{PWP}$ ), 제품담배



$$V = \frac{[\Delta P_{Cig} - \Delta P_{FT} \times \frac{L_v}{L_f}]}{K(\frac{1}{\alpha_{TP}} + \frac{5}{\alpha_{PWP}}) + [\Delta P_{Cig} - \Delta P_{FT} \times \frac{L_v}{L_f}]} \quad (1)$$

$\Delta P_{Cig}$  = Pressure drop of Cigarette with encapsulated Filter

$\Delta P_{FT}$  = Pressure drop of encapsulated Filter

$L_f$  = Filter Length

$L_v$  = Length of vent position from mouth end

$\alpha_{TP}$  = Tip paper permeability

$\alpha_{PWP}$  = Plug wrap permeability

재료품 품질의 변동이 필터 공기회석율 변동에 미치는 영향

$$V = \frac{[\Delta P_{TR} + \Delta P_{FT} \times (\frac{L_f - L_v}{L_f})]}{K(\frac{1}{\alpha_{TP}} + \frac{5}{\alpha_{PWP}}) + [\Delta P_{TR} + \Delta P_{FT} \times (\frac{L_f - L_v}{L_f})]} \quad (2)$$

$\Delta P_{TR}$  = Pressure drop of encapsulated Tobacco Column

흡인저항 ( $\Delta P_{Cig}$ ), 필터 팁 길이( $L_f$ ) 및 흡인저항 ( $\Delta P_{FT}$ ), 천공 위치 ( $L_v$ ) 요소를 측정함으로써 세울 수 있다.

다음은 PDM의 Baskevitch에 의해 세워진 필터 공기회석율을 정량적으로 계산할 수 있는 수식이다.

위 식(1)에서 담배의 흡인저항( $\Delta P_{Cig}$ )은 단순히 필터 흡인저항( $\Delta P_{FT}$ )과 각초 흡인저항( $\Delta P_{TR}$ )의 일차 합으로 나타낼 수 있고 필터 내에서의 흡인저항은 어느 점에서나 동일하다고 가정한다면 위의 식(1)은 식(2)와 같이 다시 쓸 수 있다.

### Monte Carlo Analysis

Monte Carlo Analysis(또는 Stochastic Simulation)는 물리적 시스템에 대한 확률적인 시뮬레이션의 대표적 방법이다. 이론적인 물리적 시스템의 수학적 모델을 필요로 하며 이러한 수학적 모델을 통해서 입력값들로부터 결과를 계산해낼 수 있다. 본 연구에서는 재료품 품질 변동이 공기회석율 변동에 미치는 영향을 분석하기 위하여 위의 변형된 Baskevitch 식(2)에 입력값으로 각초부 흡인저항(Tobacco Column Pressure Drop, TCPD), 필터 흡인저항(Encapsulated Filter Pressure Drop, FEPD), 팁페이퍼 기공도(Tip Paper

Permeability, TPP) 및 필터권지 기공도(Filter Plugwrap Permeability, PWP)의 4 가지 변수를 선택하여 각각 임의의 값을 입력하였으며, 필터 공기회석율과 변동율을 그 결과 값으로 얻었다. 천공 위치는 일정한 것으로 설계하였다.

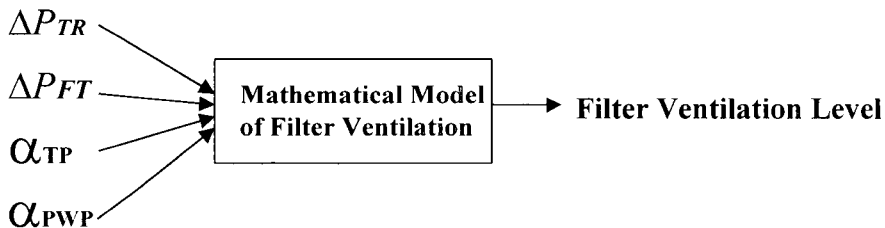
각 변수에 대해 입력값들을 난수 발생기 및 selection rule을 이용, 특정한 분포함수에 따라 값을 선택하고 그 값을 이용하여 공기회석율의 변동율을 계산하고 각 변수(재료품)의 변동에 따른 전체 공기회석율의 변동을 알아볼 수 있었다. 위에서 말한 네가지 입력값들은 central limit theorem에 의해 정규분포에 근사한다고 가정하고 임의의 평균과 표준편차에 대해서 난수를 발생시켜 각각의 값에 대하여 공기회석율을 계산, 평균과 표준편차를 구할 수 있다. 여기서 공기회석율과 각 입력값의 변동율을 나타내는 척도로써 Coefficient of Variation(CV)를 사용 한다.

$$\%CV = \frac{\text{표준편차}}{\text{평균}} \times 100$$

### 결과 및 고찰

#### 공기회석율 50% 수준인 제품담배

실험에 이용한 제품담배는 길이가 84mm이며 원주가 24.5mm이고 필터팁의 길이는 24mm이며



<그림 1 > Monte Carlo Analysis

천공이 필터 끝으로부터 12.5mm에 위치한 일반 제품담배이다. 공기회석율은 50%인 제품담배를 우선 목표로 하여 연구하였다. 제품담배가 공기회석율 50%를 갖기 위해선 여러 가지로 팁페이퍼 및 필터권지 기공도를 조합할 수 있겠지만 레이저 4열에 기공도 800 Coresta Unit 팁페이퍼와 6,500 Coresta Unit인 필터권지를 이용하였다. 그리고 각초부 및 필터팁 흡인저항은 각각 50mmH<sub>2</sub>O와 83mmH<sub>2</sub>O이다. 이들 제품담배 구성원의 품질 변동율은 각초부 흡인저항 10%CV, 필터부 흡인저항 3.8%CV, 필터권지 기공도 10%CV 및 팁페이퍼 기공도 3.8%CV 수준으로 분석되었다. 위의 각 재료품 물성을 변수로 하여 제반 물성의 평균값과 변동율을 입력하여 Monte Carlo Analysis를 실행한 결과 제품담배 공기회석율 변동은 4.0%CV 수준으로 예측되었다. 그러나 위의 물성을 갖는 제품담배의 공기회석율을 분석한 결과 변동율은 7.8%CV이었다. 이와같이 예측값과 실측값에서의 차이는 기본적으로 Baskevitch 식에서는 공기회석율에 큰 영향을 미칠 수 있는 풀붙임 상태를 고정화시켰기 때문이다.

팁페이퍼 및 필터권지를 풀에 의해서 서로 붙일 때 팁페이퍼의 천공 부위로 공기가 원활히 유입될 수 있도록 천공 중심으로부터 일정 거리만큼은 풀을 붙이지 않는데 이를 skip tip 폭이라 한다. 필립모리스의 Dwyer R. W. 등(1987), Rassmusen(1997) 및 Selke와 Mathews(1978)의 연구 결과에 의하면 제품담배 공기회석율은 skip tip 및 풀의 두께에 상당한 영향을 받는다고 주장하고 있다. 그러나 이에 대한 연구는 아직 수행되지 않아 skip tip 및 풀 두께의 변화가 공기회석율에 어떠한 영향을 미치는지는 정확히 밝혀져 있지 않으나 제품 생산 현장에서는 분명히 영향을 미치고 있음을 경험적으로 잘 알려져 있는 사실이다. 또한 Norman(1989) 및 Baker(1989)에 의하면 같은 기공도를 갖더라도 팁페이퍼의 천공 홀 크기에 의해서도 공기회석율은 영향을 받는다고 한다. 그러므로 예측 및 실측값의 차이는 이러한 차이에서 오는 것으로 사료된다.

그림 2는 Monte Carlo 시뮬레이션에 의한 팁

페이퍼 기공도 변동이 공기회석율 변동에 미치는 영향을 나타냈다. 팁페이퍼의 기공도 변동이 5%CV에서 25%CV로 증가할수록 제품담배 공기회석율 변동이 7%CV에서 11.5%CV 수준으로 증가였다.

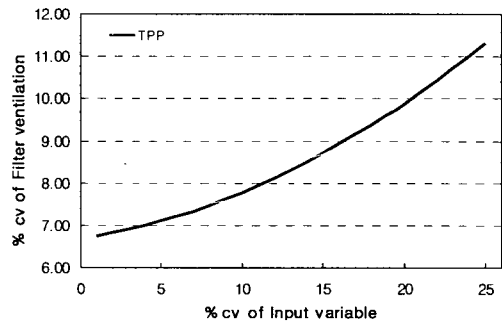


그림 2. 팁페이퍼 기공도 변동에 따른 공기회석율 변동

그림 3은 각초 흡인저항 변동에 따른 공기회석율 변동 결과를 보여 주고 있다. 각초 흡인저항 변동이 5%CV에서 25%CV로 증가할수록 제품담배 공기회석율 변동이 7.6%CV에서 10.3%CV 수준으로 증가되었으며 팁페이퍼 보다는 변동을 증가에 따른 공기회석율 변동의 폭이 작아 그래프의 곡선이 완만하다. 그림 2, 3 결과를 종합하여 고찰하면 각초 흡인저항 변동이 팁페이퍼 기공도 변동보다 공기회석율 변동에 미치는 영향

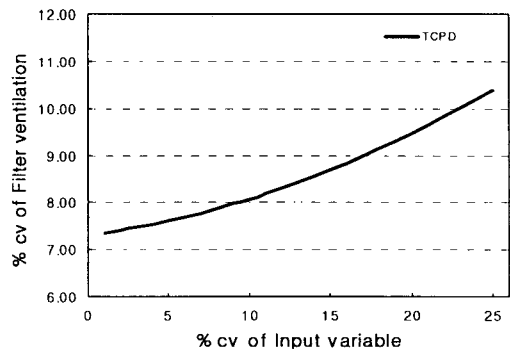


그림 3. 각초 흡인저항 변동에 따른 공기회석율 변동

이 적음을 나타낸다는 사실을 제시한다고 해석된다. 팁페이퍼의 기공도 변동이 10%CV에서 5%CV로 감소될 때 공기회석율 변동은 7.8%CV에서 6.8%CV 수준으로 낮아져 약 1%CV 수준 감소되는 반면, 각초 흡인저항은 10%CV에서 5%CV 수준으로 감소된다면 공기회석율 변동은 8%CV에서 7.5%CV로 약 0.5%CV 감소될 것이다.

그림 4는 공기회석율 50% 수준의 제품담배에서 주어진 재료품의 물성 변동이 공기회석율 변동에 미치는 영향을 조사한 결과이다. 공기회석율 변동에 미치는 영향은 다른 두 변수 - 필터팁 및 각초흡인저항 변동 보다는 팁페이퍼 및 필터권지 기공도 변동에 의해서 크게 영향을 받는다. 네 변수중에 팁페이퍼 기공도 변동에 따른 공기회석율 변동이 가장 큰 것으로 나타났다.

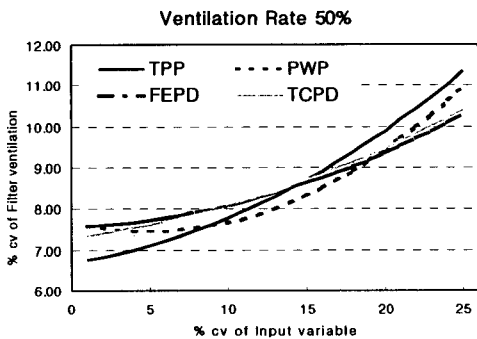


그림 4. 재료품 품질 변동이 공기회석율 변동에 미치는 영향

이는 팁페이퍼 및 필터권지 기공도, 각초 및 필터팁 흡인저항 중 팁페이퍼 기공도 변동이 공기회석율 변동에 가장 큰 영향을 미치고 있음을 제시해준다.

만일, 팁페이퍼 기공도 변동을 10%CV 수준에서 0%CV 수준으로 낮춘다면 공기회석율 변동은 7.8%CV 수준에서 6.8%CV 수준으로 감소될 수 있을 것이다.

#### 공기회석율 28% 수준인 제품담배

공기회석율 50%인 제품담배 실험에서와 같이 28% 수준의 연구에서도 담배 길이 84mm이며

원주가 24.5mm이고 필터팁의 길이는 24mm이며 천공이 필터 끝으로부터 12.0mm에 위치한 일반 제품담배를 기준하였다. 제품담배의 공기회석율 28%를 설계하기 위해서 전자천공에 기공도 300 Coresta Unit 팁페이퍼와 3,500 Coresta Unit인 필터권지를 이용하였다. 그리고 각초부 및 필터팁 흡인저항은 각각 50mmH<sub>2</sub>O와 83mm H<sub>2</sub>O이다. 제품담배 각 구성원의 품질 변동율을 분석한 결과 각초부 흡인저항의 변동은 10%CV, 필터부 흡인저항 3.8%CV, 필터권지 기공도 10%CV 및 팁페이퍼 기공도 변동은 3.8%CV 수준이었다. 위의 각 재료품 물성을 변수로 하여 각 구성원의 평균값과 변동율을 입력하여 Monte Carlo Analysis를 실행한 결과 제품담배 공기회석율은 28%였으며 변동율은 6.3%CV 수준으로 예측되었다. 위 물성을 갖는 재료로 제품담배를 제조하여 공기회석율을 실측한 결과 29.7%였으며 변동율은 6.2%CV로 공기회석율 50% 설계 제품에서 보다는 예측 및 실측값이 잘 일치하는 것으로 분석되었다.

그림 5는 공기회석율 28%로 설계된 제품에 있어서의 각 재료품 품질 변동에 따른 공기회석율 변동을 Monte Carlo Analysis에 의해서 분석한 결과를 나타낸 것이다.

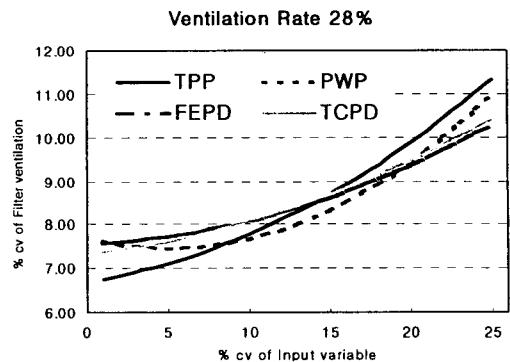


그림 5. 재료품 품질 변동이 공기회석율 변동에 미치는 영향

품질 변동에 따른 공기회석율 변동은 공기회석율 50% 설계실험에서와 비슷한 경향으로 분

석되었으나 각 재료품의 품질변동이 제품담배 공기회석을 변동에 미치는 영향은 약간의 차이를 보여 주었다.

각 재료품의 품질 변동이 공기회석을 변동에 미치는 영향을 보면 역시 톱페이퍼 기공도 변동의 변화가 공기회석을 변동에 가장 민감하게 반응하며, 필터 팁 및 각초부 흡인저항 변동이 공기회석을 변동에 비교적 네 변수 중에서는 적게 영향을 미치는 것으로 분석되었다.

### 결 론

제품담배 설계에서 각 재료품의 품질 변동이 공기회석을 변동에 미치는 영향은 설계에 따라서 그 영향이 다르게 나타나는 것으로 분석되었으며, 제품담배 공기회석을 변동은 재료품 품질의 변동폭을 감소시킴으로써 줄일 수 있다. 재료품의 품질 변동이 공기회석을 변동에 미치는 영향은 톱페이퍼 기공도 변동의 변화가 공기회석을 변동에 가장 민감하게 반응하며, 필터팁 및 각초부 흡인저항 변동이 공기회석을 변동에 비교적 네 변수 중에서는 적게 영향을 미치는 것으로 분석되었다.

또한 Monte Carlo Analysis를 이용하면 천공 필터담배의 필터 설계시 제품의 공기회석을 및 품질변동 수준을 예측할 수 있을 것으로 확인되었다. 그러나 예측 및 실측값이 보다 잘 일치하기 위해서는 공기회석율에 영향을 미치는 skip tip과 풀붙임에 대한 연구뿐 아니라 천공홀 크기, 천공홀 수 및 천공열에 의한 영향도 검토되어 보다 정확한 예측값들을 얻을 수 있는 수학적 모델식의 정립이 필요할 것으로 생각된다.

### 감사의 글

본 연구는 한국담배인삼공사의 출연 연구비(과제 연구비)로 수행되었으며 이에 감사의 뜻을 표합니다.

### 참 고 문 헌

Baker R. R.(1989) The Viscous and Inertial Flow of Air through Perforated Papers, *Beitrag zur Tabakforschung International*, Vol. 14, No. 5, pp 253-260.

Dwyer R. W., K. A. Cox, and J. E. Bickett(1987) Source of Pressure Drop and Ventilation Variability in Cigarettes, *Recent Advances in Tobacco Science*, Vol. 13, pp 82-118.

Markus Voges(1998) The influence of Filter on Quality, *Tobacco Journal International*, May, pp 95-100

Nicholas Baskevitch(1995) Reducing Variability, *Tobacco Reporter*, March pp 40-44

Ramussen G. T.(1996) Pressure Drop and Filter Ventilation Variability in Cigarettes by Monte Carlo Analysis, 50th Tobacco Chemists Research Conference, Richmond, VA, October

Ramussen G. T.(1997) The Effects of Cigarette Component Variability on Filter Ventilation Variability by Monte Carlo Analysis, paper presented at the Meeting of CORESTA Smoke and Technology Groups, pp 79-86, Hamburg, Germany, 7-11 September.

Selke W. A.(1978) Dilution of Cigarette Smoke through Ventilation of Filters, *Beitrag zur Tabakforschung International*, Vol. 9, No. 4, pp 190-192.

Selke W. A. and J. H. Mathews(1978) The Permeability of Cigarette Papers and Cigarette Ventilation, *Beitrag zur Tabakforschung International*, Vol. 9, No. 4, pp 193-200.