

필련 품질 최적화에 대한 수학적 모델

오인혁[†] · 변윤섭* · 정경락**

한국인삼연초연구원 상품개발부

*전북산업대학교 공업화학과

**전북대학교 공과대학 화학공학부, 공업기술연구소

(1997년 3월 5일 접수, 1997년 11월 27일 채택)

A Mathematical Model for the Optimization of the Cigarette Quality

In-Hyeog Oh[†], Youn-Seop Byoun* and Gyeong-Rak Jheong**

Div. of Tobacco Product Development, Korea Ginseng and Tobacco Research Institute

*Dept. of Industrial Chemistry, Chonbuk San-up University

**School of Chemical Engineering, Chonbuk National University

(Received 5 March 1997; accepted 27 November 1997)

요 약

담배의 부풀성은 필련의 품질과 무게에 크게 영향을 미치기 때문에 필련 제조기의 제어계에서 그 크기와 변동에 따른 품질의 최적화도 기할 수 있고 그때의 필련 무게도 계산할 수 있는 수학적 모델이 꾸준히 연구개발되어 왔다. 그 중에서도 Wochnowski의 모델은 대표적인 것으로 들 수 있으며 현재 제조 공정 중에 이용되고 있는 경우도 있지만 수학적 결함이 있어 보완 또는 후속 조치 등을 필요로 하였다. 본 연구에서는 새로운 수학적 모델을 개발하여 부풀성의 변동에 따른 필련 품질의 차이를 최소화 할 수 있을 뿐 아니라 수학적으로도 전혀 결함이 없는 새로운 모델을 개발하여 개선된 필련 제조기의 제어계를 구축할 수 있게 되었다.

Abstract—The mathematical models have been developed to calculate the cigarette weight and to optimize the qualities of cigarette affected by fluctuations of filling power on the control system of the cigarette maker. Even if Wochnowski's model of these is useful in practice, it has the mathematical faults. Therefore, in this paper we have developed the improved model and applied it to the control system of the cigarette maker. This new model is very useful enough to optimize the cigarette weight and to minimize the variation of the cigarette qualities by the fluctuations of filling power.

Key words: Mathematical Model, Optimization, Cigarette Quality

1. 서 론

담배 제조공정 중에 팽화공정은 제조원가의 절감과 최근 애연가들이 순한 맛의 담배를 원하는 추세에 비추어 그 중요도가 날로 커지고 있으며 지난 20년 동안 꾸준한 연구가 있었지만 그 중에서도 R. J. Reynolds의 G-13공정[1], Philip Morris의 DIET공정[2] 그리고 Reemtsma의 INCOM공정[3] 등은 대표적인 예로 들 수 있다.

팽화(expansion)의 기본원리는 생체와 환경에 나쁜 영향을 주지 않을 뿐 아니라 산업적으로 안정한 가스나 유기용매 또는 증기를 담배잎의 조직 내부에 포화시킨 뒤 열처리 과정을 거치면 내부의 물질이 급격히 분출되면서 열조각이 부풀려져 내부 공극이 커지도록 하는 것이며 그에 따라 담배의 품질을 좌우하는 여러 가지 물리적 성질을 향상시키는 것이다[4]. 이러한 물리적 성질로는 제품의 부풀성(filling power), 경도(hardness), 연소속도(burning rate) 그리고 끝빠짐

(loose ends) 등이 있다. 한편 담배 맛과 관련되는 이화학적 특성도 변하는데 연기성분 중에 타르(tar), 니코틴 및 일산화탄소의 이행(delivery)량이 감소하게 된다[5].

Molins Advanced Technology Unit를 비롯한 담배관련 엔지니어링 회사들은 담배제조 공정에서 공정제어와 최적화를 위하여 꾸준히 연구 노력해 왔다. 몇 가지 예로서 필련 제조공정의 모델링을 통한 각 담배 제조기들의 배치를 최적화하려는 시도가 있었으며[6], 최근에는 필련의 끝빠짐이나 무게변화와 같은 물리적 특성을 예측하여 최적화할 수 있는 수학적 모델이 개발되기도 하였다[7]. 그리고 원료 가공 공정 단계에서 담배의 부풀성의 최적화는 많은 진전이 있었고, 그 중 Körber AG는 순엽 및 주맥의 최신 HT 팽화공정을 개발하였다[8].

필련의 품질을 나타내는 대표적인 인자들로는 필련의 경도, 흡인 저항(pressure drop), 연소속도, 니코틴과 일산화탄소 그리고 건조된 응축물(dry condensate)의 양들이며, 이들은 필련의 부풀성과 무게에 밀접한 함수관계를 갖는다. 그런데 담배 제조공정 중에 팽화기를 사용하는데 따른 두 가지 중요한 문제에 부딪히게 된다. 첫 번째는 팽

[†]E-mail: ihoh@grr.kgri.re.kr

화 각초(strand)를 이용하여 만든 궐련의 품질인자값이 팽화전 원 담배로 만든 궐련값에 비해서 상당히 차이가 생긴다. 따라서 원 담배의 특성값에 부합되도록 궐련의 무게를 조절하는 방법이다. 두 번째는 담배 제조공정을 거치면서 부풀성에 편차가 발생하는데 그 대표적인 요인은 다음과 같다[9].

- 건조공정에 따른 10 %이상의 편차
- 건조공정 전 각초의 함수율에 따른 7 %이상의 편차
- 각초의 길이에 따라서 11 %이상의 편차
- 담배 배합물의 불균일도에 따른 편차

이러한 부풀성의 편차에 따른 궐련품질의 불균일성을 피하기 위하여 궐련 제조기의 중량 조절계에서 부풀성을 고려하여 그 무게를 최적화시키면 이러한 문제점들을 해결할 수 있다. Wochnowski[9]는 부풀성의 편차에 따른 궐련 무게의 최적화된 값을 구하기 위하여 수학적 모델을 제안하였다.

그러나 그 모델은 제조공정에 적용되고 있기는 하지만 수학적으로 결함을 가지고 있으므로 전체 조건없이 실질적으로 각 품질인자의 편차를 반영하여 그 전체의 합을 최소화할 수 있는 새로운 수학적 모델을 제시하고자 한다. 단 Wochnowski의 기본 모델은 유지하면서 1, 2차 미분을 통한 변형으로 각 인자의 절대편차의 합을 최소화할 수 있도록 하였으며 수치해의 방법이 간편하여 실용성을 높이고자 한 것이다.

2. 궐련 품질을 최적화하기 위한 수학적 모델

Wochnowski는 Fig. 1과 같은 “부풀성을 고려한 단련 조절계”에서 궐련의 무게를 최적화하기 위하여 다음과 같은 식을 제안하였다.

$$\sum_{i=1}^n k_i (\Delta y)_i = 0 \quad (1)$$

$$\text{여기서 } (\Delta y)_i = \frac{y_i - y_{0i}}{y_{0i}} \cdot 100$$

$$y_i = a_i W + b_i F + c_i$$

$$y_{0i} = a_i W_0 + b_i F_0 + c_i$$

여기에서 y_i 는 궐련의 무게(W)와 담배의 부풀성(F)을 독립변수로 하는 다중회귀식으로서 품질 특성치이다. 그는 Table 1과 같이 궐련의 정도, 흡인저항, 연소속도, 니코틴과 일산화탄소 그리고 건조된 응축

Table 1. Wochnowski's regression plane equations

$$Y_1 = H = -0.0027 W - 0.0706 F + 6.665 \text{ mm FR}$$

$$Y_2 = P = 0.152 W + 4.58 F - 137.6 \text{ mm WG}$$

$$Y_3 = \text{p.p.c.} = 0.0178 W + 0.0856 F - 6.23 \text{ p.p.c.}$$

$$Y_4 = \text{Ni} = 0.001 W + 0.0104 F - 0.27 \text{ mg/cig.}$$

$$Y_5 = \text{CO} = 0.016 W + 0.408 F - 6.8 \text{ ml/cig.}$$

$$Y_6 = \text{DC} = 0.0039 W + 0.285 F + 8.46 \text{ mg/cig.}$$

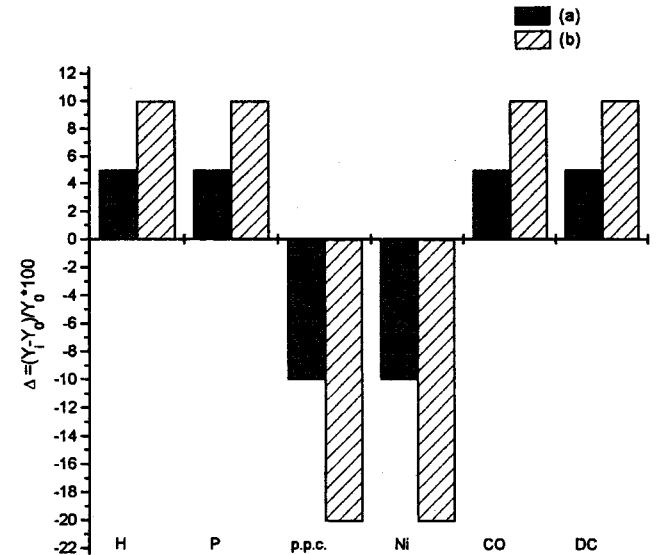


Fig. 2. Percentage changes affecting the cigarette characteristics.

물을 대표적인 품질 특성치로 선택하였다.

그의 수학적 모델은 다중회귀식들을 사용하여 궐련 무게를 조절 하므로서 선택된 품질인자들의 편차 합이 “0”인 기준선에 근접하게 하고, 원 담배와 품질 편차가 줄어들게 하였다. 그러나 모든 품질인자가 부풀성에 따라서 변화량이 “양” 또는 “음”의 값 중에 동일한 하나의 값만을 갖지 않고 Fig. 2에서처럼 각 인자마다 부호가 달라지므로 식 (1)은 궐련 무게를 조정하므로서 각 품질 인자의 실질적인 편차를 줄이지 못하며 상호 인자 간의 보완 작용에 의해서 전체 합이 “0”이 될 뿐이다. 예를 들면 Fig. 2의 (a)와 (b)는 동일하게 전체 품질 인자의 편차 합이 “0”이지만 각 품질인자의 편차는 차이가 있음을 보여준다.

비록 Wochnowski[9]가 보고한 것처럼 상기 모델을 적용하여 궐련 무게를 제어하면 분산도는 줄어들지 모르지만 사실은 그와 같은 수학적 결함을 내포하고 있다.

따라서 각 품질인자의 편차를 반영함과 동시에 그 전체 합도 최소화할 수 있는 다음과 같은 최적화 모델을 세운 것이다.

$$\begin{aligned} \text{Minimize } f(W) &= \sum_{i=1}^n k_i (\Delta y)_i^2 \\ \text{Subject to } W &> 0 \end{aligned} \quad (2)$$

식 (2)의 목적함수를 Wochnowski가 제안한 다중회귀식을 사용하여 변형하면 다음과 같은 수학적 표현식을 얻을 수 있다.

$$\begin{aligned} f(W) &= \sum_{i=1}^n k_i (\Delta y)_i^2 \\ &= \sum_{i=1}^n k_i \left\{ \left(\frac{a_i W + b_i F + c_i}{y_{0i}} \right)^2 - 2 \left(\frac{a_i W + b_i F + c_i}{y_{0i}} \right) + 1 \right\} \end{aligned} \quad (3)$$

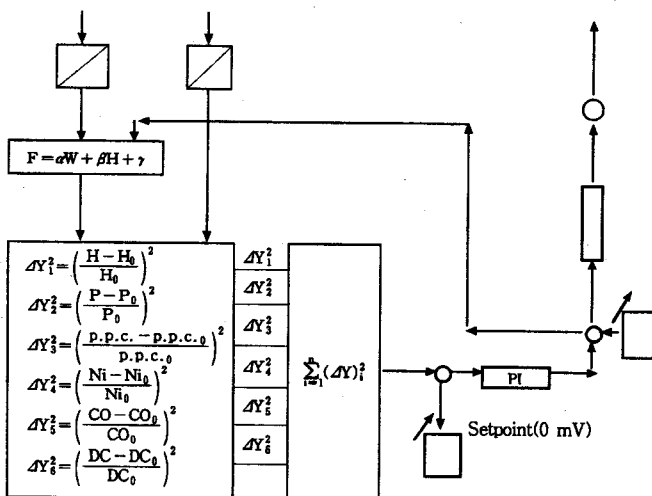


Fig. 1. Schematic diagram of the cigarette maker's control system.

여기서 $(\Delta y)_i = \frac{y_i - y_{0i}}{y_{0i}}$ 이고, 부풀성 F는 제어할 수 없는 변수이므로 $\sum_{i=1}^n k_i (\Delta y)_i^2$ 는 켈런 무게(W)의 이차함수가 되어 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$f(W) = \sum_{i=1}^n k_i (\Delta y)_i^2 = AW^2 + BW + C \quad (4)$$

여기서 A, B, C는 W의 계수로서 아래와 같다.

$$A = \sum_{i=1}^n k_i \left(\frac{a_i}{y_{0i}} \right)^2$$

$$B = 2 \sum_{i=1}^n k_i a_i \left(\frac{b_i F + c_i - y_{0i}}{y_{0i}^2} \right)$$

$$C = \sum_{i=1}^n k_i \left(\frac{b_i F + c_i - y_{0i}}{y_{0i}} \right)^2$$

식 (4)에서 $f(W)$ 를 W에 대해서 1차 미분하면

$$\begin{aligned} \frac{df(W)}{dW} &= 2A \cdot W + B \\ &= 2 \left\{ \sum_{i=1}^n k_i \left(\frac{a_i}{y_{0i}} \right)^2 \right\} \cdot W + 2 \sum_{i=1}^n k_i a_i \left(\frac{b_i F + c_i - y_{0i}}{y_{0i}^2} \right) \end{aligned} \quad (5)$$

이때 식 (5)를 W에 대해서 다시 미분하면 다음과 같다.

Table 2. Evaluated individual characteristics of regression plane equations

Before expansion	Units	After expansion	Weighting factors
y_{01} -cigarette hardness	H(mm FR)	y_1	k_1
y_{02} -pressure drop	P(mm WG)	y_2	k_2
y_{03} -burn rate puffs per cigarette	p.p.c.	y_3	k_3
y_{04} -nicotine in smoke	Ni(mg/cig.)	y_4	k_4
y_{05} -CO in smoke	CO(ml/cig.)	y_5	k_5
y_{06} -dry condensate in smoke	DC(mg/cig.)	y_6	k_6

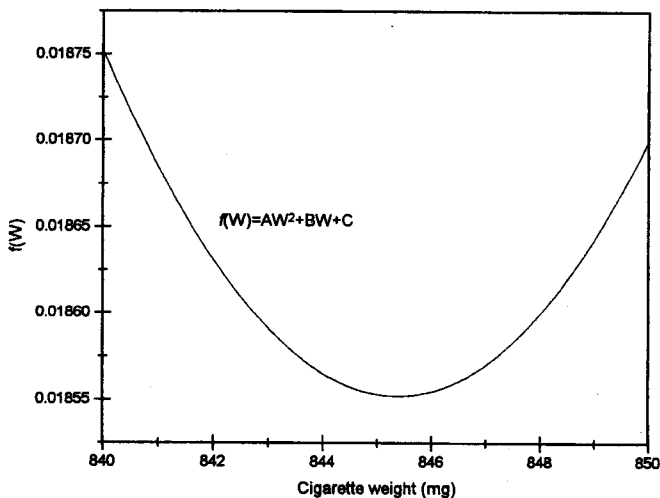


Fig. 3. Accumulated changes of quality parameters as function of cigarette weight.

$$\frac{d^2f(W)}{dW^2} = 2A = 2 \sum_{i=1}^n k_i \left(\frac{a_i}{y_{0i}} \right)^2 \quad (6)$$

그러므로 식 (6)에서 항상 $k_i > 0$ (관능 평가위원에 의해서 결정되어지는 가중치)이므로

$$\frac{d^2f(W)}{dW^2} = 2 \sum_{i=1}^n k_i \left(\frac{a_i}{y_{0i}} \right)^2 > 0 \text{ 이다.}$$

따라서 $f(W)$ 는 Fig. 3에서처럼 아래로 볼록한 이차함수 형태의 포물선을 이루므로 항상 최소점을 갖는다. 이러한 사실은 목적함수가 최소화되기 위한 충분조건을 만족시킨다.

그리고 식 (5)에서 $df(W)/dW=0$ 이면 그 점에서 최소치를 갖기 때문에 Fig. 4의 W_s 에서 최소치는 $f(W_s)$ 이다.

$$W_s = - \frac{\sum_{i=1}^n k_i a_i \left(\frac{b_i F + c_i - y_{0i}}{y_{0i}^2} \right)}{\sum_{i=1}^n k_i \left(\frac{a_i}{y_{0i}} \right)^2} \quad (7)$$

식 (7)은 구하려는 켈런 무게에 대한 일반화한 최적해이다.

또한 Wochnowski가 제안한 모델에 적용하여 구한 해는 다음과 같다.

$$W_{sw} = - \frac{\sum_{i=1}^n k_i \left(\frac{b_i F + c_i - y_{0i}}{y_{0i}} \right)}{\sum_{i=1}^n k_i \left(\frac{a_i}{y_{0i}} \right)} \quad (8)$$

따라서 식 (8)은 식 (7)과 비교하여 차이가 있음을 알 수 있다.

식 (7)은 식 (2)에서의 제약조건인 $W > 0$ 을 무시하고 제약조건이 없는 경우의 일반해를 구하는 해석적 방법을 이용하였다. 그러나 Fig. 4에서처럼 그 해가 물리적으로 의미를 갖는 경우는 (a)와 같은 그림일 경우이다. 즉 W_s 는 0보다 커야 하는데 이러한 조건을 만족시켜 주기 위하여서는 다음과 같은 식이 성립되어야 한다.

$W_s > 0$ 이 되려면

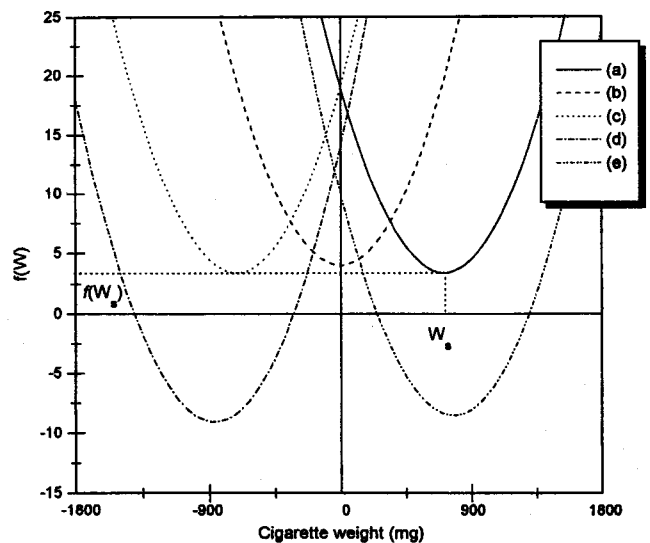


Fig. 4. Various types of objective functions.

$$\sum_{i=1}^n k_i \left(\frac{a_i}{y_{0i}} \right)^2 > 0 \text{ 이므로}$$

$$-\sum_{i=1}^n k_i a_i \left(\frac{b_i F + c_i - y_{0i}}{y_{0i}^2} \right) > 0 \quad (9)$$

이어야 한다.

그러나 이는 식 (2)가 부등호 제약 조건이 있는 최적화 해의 하나이며, 일반적인 모든 가능한 해를 전부 구하여 보면 Fig. 4와 같이 5가지 형태의 그래프로 나타낼 수 있다. 그 중 그래프 (b)는 최소점이 $W_0=0$ 이고, (c)와 (d)는 $W_0<0$ 이므로 곡선 (b), (c) 그리고 (d)는 모두 물리적으로 의미가 없다. 또한 Fig. 4에서 목적함수는 항상 아래로 볼록하고 모든 W 값에서 항상 $f(W) \geq 0$ 이므로 (e) 형태의 그래프는 존재할 수 없다.

그러므로 식 (2)의 해는 오로지 항상 $\sum_{i=1}^n k_i a_i \left(\frac{b_i F + c_i - y_{0i}}{y_{0i}^2} \right) \geq 0$ 보다 작아야 한다는 전제 조건을 만족시켜줄 때의 식 (7) 값에 국한된다. 식 (9)는 제약 대상인 필련 무게와 상관없이 없으므로 상기 조건을 만족시키면 제약조건이 없는 경우의 최소화 방법으로 해결할 수 있다.

그리고 제약조건이 없는 경우의 최적화 방법으로는 크게 direct method와 indirect method가 있는데 본 문제에서는 목적함수의 최적해가 해석적으로 쉽게 해결되므로 indirect methods 중에 하나인 해석적 방법을 이용하는 것이 더 효율적이다.

3. 응용 사례 연구

상기 모델을 통해 구해진 해와 Wochnowski의 수학적 모델의 해를 비교 평가하기 위하여 다음과 같은 응용 사례들에 적용하여 보기로 한다. 단 본 논문의 예들에서 사용한 필련 무게와 부풀성의 크기는 실제 공정에서 이루어지고 있는 값들의 근사치이고, Wochnowski의 논문[9]에서 인용한 다중회귀식들의 계수들이 두 가지 독립변수(필련 무게, 부풀성)의 적용 범위에 따라 제한을 받는다는 보고는 없었지만 그의 논문에서 사용된 값들을 기준으로 하여 가능한 한 큰 편차가 없는 값들을 사용하였다.

첫 번째 사례로서 팽화전의 부풀성 $F_0=27.9 \text{ mmFR}$ 이고 팽화 후의 부풀성 $F=30.9 \text{ mmFR}$ 이며 팽화전의 필련 무게를 $W_0=900 \text{ mg}$ 으로 하였을 때 가중치들 중에서 k_1, k_3, k_4, k_5, k_6 는 편의상 모두 "1"로 고정하고 흡인저항 인자의 가중치인 k_2 만을 0, 1, 5와 ∞ 로 변화시켜 대입하였다.

3-1. Wochnowski의 모델을 적용한 해

k_2 의 여러 가지 가중치에 따라서 다양한 기울기의 직선이 얻어지는데 이들은 모두 W 축을 지나며, 그 교점이 다음 조건을 만족시키는 최적해이다.

$$\sum_{i=1}^n k_i (\Delta y)_i = 0$$

따라서 식 (8)에 대입하면 다음과 같다.

$$W_{sw} = \frac{-0.979k_1 + 0.969k_2 + 1.294k_3 + 0.944k_4 + 0.694k_5 + 0.133k_6}{(-1.19k_1 + 1.20k_2 + 1.46k_3 + 1.09k_4 + 0.843k_5 + 0.196k_6) \times 10^{-3}}$$

$$= \frac{(0.969k_2 + 2.086) \times 10^3}{1.20k_2 + 2.40}$$

여기서 필련무게의 최적해는 $k_2=0$ 이면 869 mg , $k_2=1$ 이면 849 mg 이

되고, $k_2=5$ 인 경우에는 825 mg 으로 감소하며, $k_2 \rightarrow \infty$ 에서는 동일한 흡인저항을 나타내는 경우 그 무게는 808 mg 이 되어 이것이 최적해가 된다. 여기서 $k_2=0$ 의 의미는 흡인저항을 필련 품질 인자에서 제외하는 경우이고, $k_2 \rightarrow \infty$ 는 흡인저항 외에 다른 5가지의 품질 인자를 제외하는 경우이다. 따라서 흡인저항에 가중치를 많이 줄수록 필련 무게의 최적해는 Fig. 5의 (a)에서처럼 초기에는 감소하지만 k_2 를 무한으로 증가시킴에 따라 최적해는 극한값에 수렴하게 된다.

3-2. 새로운 모델을 적용한 해

상기의 사례를 풀기 위하여서는 먼저 제약조건이 없는 경우의 최적화 방법으로 해결할 수 있는지의 여부를 알아보아야 한다.

3-2-1. 최적해가 존재하기 위한 조건

Table 1에서 보여주는 각 회귀식의 계수를 식 (9)에 적용하면 다음과 같다.

$$\sum_{i=1}^n k_i a_i \left(\frac{b_i F + c_i - y_{0i}}{y_{0i}^2} \right) = \sum_{i=1}^n \frac{k_i a_i b_i (F - F_0) - k_i a_i^2 W_0}{y_{0i}^2}$$

$$= -(1.17 \times 10^{-3} k_1 + 1.16 \times 10^{-3} k_2 + 1.89 \times 10^{-3} k_3 + 1.03 \times 10^{-3} k_4 + 5.85 \times 10^{-4} k_5 + 2.61 \times 10^{-5} k_6) \quad (10)$$

여기서 가중치는 $k_1, k_3, k_4, k_5, k_6 > 0$ 이고 $k_2 \geq 0$ 이므로 식 (10)은 항상 0보다 작다. 따라서 이 경우는 가중치와 상관없이 제약조건이 없는 경우의 최소치는 우리가 찾고자 하는 최적해가 된다.

3-2-2. 최적해

상기 사례의 경우에 해를 구하기 위하여 식 (7)에 대입하면 다음과 같다.

$$W_s = \frac{(1.17k_1 + 1.16k_2 + 1.89k_3 + 1.03k_4 + 0.585k_5 + 0.0261k_6) \times 10^{-3}}{(1.42k_1 + 1.44k_2 + 2.13k_3 + 1.19k_4 + 0.710k_5 + 0.0380k_6) \times 10^{-6}}$$

$$= \frac{(1.16k_2 + 4.70) \times 10^3}{1.44k_2 + 5.49} \quad (11)$$

이는 필련 무게의 최적해는 $k_2=0$ 이면 856 mg 이고, $k_2=1$ 이면 846 mg 이 되며, $k_2=5$ 인 경우에는 827 mg 으로 감소한다. $k_2 \rightarrow \infty$ 에서는 동일한 흡인저항을 갖으면서도 그 최적해는 806 mg 이 되어 Wochnowski의 해에 비하여 작고 k_2 값의 어느 한계에서 전자의 것은 수렴할지라도 새로운 모델에 의하여 구한 해는 계속하여 감소하는 경향을 보

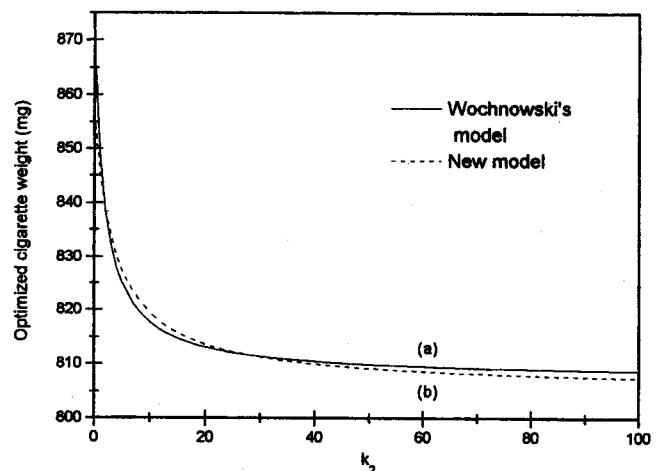


Fig. 5. Effects of pressure drop's weighting factor on optimized cigarette weight by two models.
(k_1 and $k_3-k_6=1$, $W_0=900 \text{ mg}$, $F_0=27.9 \text{ mmFR}$, $F=30.9 \text{ mmFR}$)

Table 3. The optimized cigarette weight with two mathematical models at $k_1, k_3-k_6=1, W_0=900$ mg, $F_0=27.9$ mmFR and $F=30.9$ mmFR

Model k_2	Wochnowski's model(mg)	New model		Error(mg) ¹⁾
		Eq. (9)	Optimized solutions(mg)	
0	869	>0	856	+13
1	849	>0	846	+3
5	825	>0	827	-2
∞	808	>0	806	+2

¹⁾Error=(optimized cigarette weight with Wochnowski's model)
- (optimized cigarette weight with new model)

Table 4. The optimized cigarette weight with two mathematical models at $k_1, k_3-k_6=1, W_0=900$ mg, $F_0=35.9$ mmFR and $F=40.9$ mmFR

Model k_2	Wochnowski's model(mg)	New model		Error(mg) ¹⁾
		Eq. (9)	Optimized solutions(mg)	
0	880	>0	816	+64
1	834	>0	807	+27
5	784	>0	788	-4
∞	749	>0	750	-1

¹⁾Error=(optimized cigarette weight with Wochnowski's model)
- (optimized cigarette weight with new model)

여주고 있다. k_2 에 따른 최적해의 변화는 Fig. 5의 (b)와 같다. 앞에서 계산한 결과를 Table 3에 정리하였다.

그리고 Wochnowski의 모델과 새로운 모델의 최적해 사이에는 값의 차이가 존재하는데 그 차 ΔW_s 는 다음과 같다.

$$\Delta W_s = \frac{(0.969k_2 + 2.086) \times 10^3}{1.20k_2 + 2.40} - \frac{(1.16k_2 + 4.70) \times 10^3}{1.44k_2 + 5.49}$$

$$= \frac{3.36k_2^2 - 100k_2 + 172}{1.73k_2^2 + 10.04k_2 + 13.18} \quad (12)$$

또 다른 응용사례를 Table 4에 나타내 보았다. 팽화전의 필런 무게 $W_0=900$ mg이고 부풀성은 $F_0=35.9$ mmFR이며 팽화후의 부풀성 $F=40.9$ mmFR일 때 가중치들 중에서 k_1, k_3, k_4, k_5, k_6 는 모두 동일한

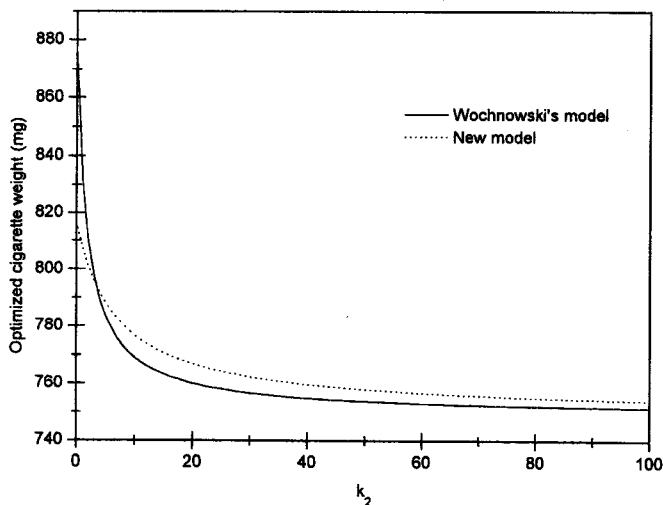


Fig. 6. Effects of pressure drop's weighting factor on optimized cigarette weight by two models.
(k_1 and $k_3-k_6=1, W_0=900$ mg, $F_0=35.9$ mmFR, $F=40.9$ mmFR)

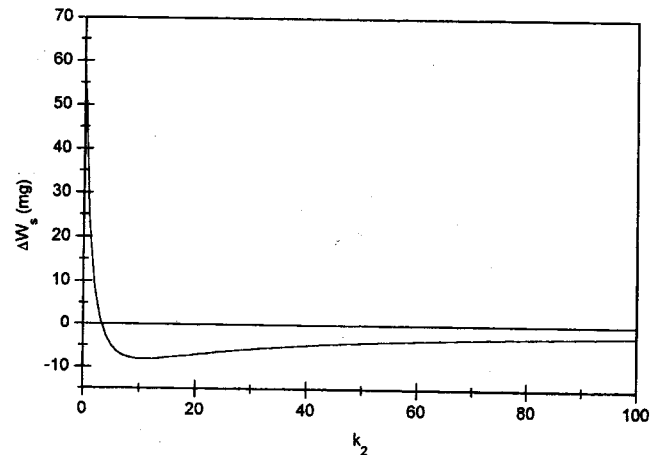


Fig. 7. Effects of pressure drop's weighting factor on differences of two models' solutions.

($k_1=1, k_3-k_6=1, W_0=900$ mg, $F_0=35.9$ mmFR, $F=40.9$ mmFR)

값인 "1"로서 가정하고 흡인저항 인자의 가중치인 k_2 를 이 예에서도 0, 1, 5와 ∞ 로 대입하여 보았다. 그 결과 Fig. 6에서 보는 바와 같이 k_2 값이 10이상의 범위에서는 그 값이 커질수록 차이는 줄어든다. 즉 이는 k_2 값이 다른 가중치 보다 상당히 커진다면 실질적으로 다른 품질 인자들의 회귀식이 미치는 영향은 줄기 때문에 그 차이가 감소하는데, 이는 결국 단일 인자만을 고려한 최적해는 앞의 두 가지 모델에 있어서 동일해줄 갖게 된다는 사실로 미루어 예측할 수 있다. 이러한 사실은 두 모델에 의해서 구해진 최소치 사이의 차이를 나타내는 Fig. 7의 경우에서 $k_2 \rightarrow \infty$ 이면 곡선이 "0"에 접근함을 분명하게 확인할 수 있다.

그리고 두 가지 모델 사이의 차이가 필런의 부풀성과 원 무게에 따라서 얼마나 변하는지를 알아보기 위하여 각 사례별로 상기의 계산과정을 통하여 Table 5-7에 정리하여 보았다.

Table 5에서 원 담배의 부풀성에 비해서 편차가 증가할수록 두 모델의 최적해간에 차이도 증가함을 보여준다. 그러한 사실을 Fig. 8에 그래프로 나타내어 보았는데 부풀성의 증가에 따라 차이는 더 크게

Table 5. The optimized cigarette weight with two mathematical model at $k_1-k_6=1, W_0=900$ mg and $F_0=27.9$ mmFR

Model F (mmFR)	Wochnowski's model(mg)	New model		Error(mg) ¹⁾
		Eq. (9)	Optimized solutions(mg)	
30.9	849	>0	846	+3
35.9	769	>0	757	+12
40.9	686	>0	667	+19

¹⁾Error=(optimized cigarette weight with Wochnowski's model)
- (optimized cigarette weight with new model)

Table 6. The optimized cigarette weight with two mathematical models at $k_1-k_6=1, F_0=27.9$ mmFR and $F=40.9$ mmFR

Model W_0 (mg)	Wochnowski's model(mg)	New model		Error(mg) ¹⁾
		Eq. (9)	Optimized solutions(mg)	
700	485	>0	494	-9
800	584	>0	581	+3
900	686	>0	667	+19

¹⁾Error=(optimized cigarette weight with Wochnowski's model)
- (optimized cigarette weight with new model)

Table 7. The optimized cigarette weight with two mathematical model at $k_1-k_2=1$, $W_0=900$ mg and $F=40.9$ mmFR

Model F_0 (mmFR)	Wochnowski's model(mg)	New model		Error(mg) ¹⁾
		Eq. (9)	Optimized solutions(mg)	
27.9	686	>0	667	+19
30.9	745	>0	720	+25
35.9	834	>0	807	+27

¹⁾Error=(optimized cigarette weight with Wochnowski's model)
- (optimized cigarette weight with new model)

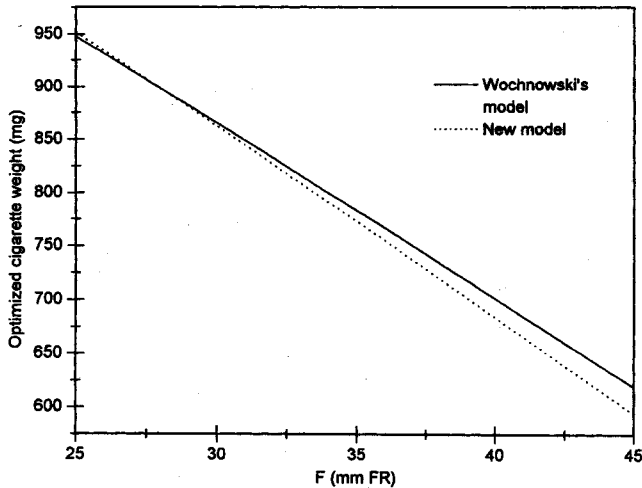


Fig. 8. Effects of filling power after expansion on optimized cigarette weight by two models.

($k_1-k_2=1$, $W_0=900$ mg, $F_0=27.9$ mmFR)

변하는 모습을 보여주고 있다. 그리고 원 필련 무게의 값이 변함에 따라 발생하는 차이를 Table 6에 나타냈는데 두 모델의 무게에 따른 절대변화량은 일정한 직선적인 경향성을 띠지는 않았으나 상당한 관련성이 있음을 보여주고 있다.

Table 7에서는 원 담배의 부풀성 크기에 따른 두 모델의 최적해 사이에 존재하는 차이는 정비례하여 증가함을 보여주고 있다. 특히 $F_0=35.9$ mmFR인 경우는 부풀성의 변화가 단지 14% 증가하였음에도 불구하고 상당히 큰 차이를 보여주는데 이는 두 모델간의 차이는 다른 인자에 비해서 원 담배의 부풀성 크기에 따라 크게 영향을 받음을 알 수 있다.

이들을 종합하면 Wochnowski model의 최적해는 새로운 모델의 최적해를 기준으로 비교하면 상당히 큰 차이를 보여주는데 모든 가중치를 고려한 경우에 있어서는 두 해 사이에 최고 27mg까지 차이가 발생하였다. 따라서 Wochnowski model은 필련 제조기의 제어계에서 필련무게를 최적화하기 위한 수학적 모델로서는 부적합하고 부풀성의 편차에 따른 필련의 품질 편차를 줄이기 위해서는 여기서 제안한 새로운 모델을 적용하는게 바람직하다고 생각된다.

4. 결 론

담배 원료 가공공정 중에 부풀성의 편차가 여러 가지 원인에 의해서 발생하는데 특히 팽화공정과 건조 전후 공정에서 많이 발생한다. 이러한 편차는 다음 공정인 필련 제조공정에서 품질의 불균일성을

유발하기 때문에 그 편차를 최소화해 주기 위한 최적화 작업이 필요하다.

필련 제조기의 제어계에서는 일정시간 간격으로 부풀성의 편차를 측정하여 필련 무게를 조절하는데 Wochnowski는 수학적 모델로서 식 (1)을 제안하였다. 그러나 이 모델은 일부 현장에서 비록 적용되고 있기는 하지만 수학적으로 문제점을 내포하고 있으며 필련의 품질관리면에서 상당한 오차를 감안하지 않으면 안된다.

따라서 부풀성의 변화에 따라 발생할 수 있는 모든 경우의 각 품질 인자의 편차를 최소화하고 동시에 원하는 담배와 품질 편차를 줄일 수 있는 최적해를 구하기 위하여 새로운 수학적 모델을 개발하였다.

두 모델을 이용하여 구한 최적해 사이에는 상당한 차이가 있었으며 새로운 모델에 의하여 구한 값이 품질의 편차를 줄일 수 있을 뿐 아니라 필련의 무게를 조절하는데도 유익하였다.

사용기호

A, B, C : coefficients of the quadratic equation

a, b, c : coefficients of the regression plane equations

F : filling power [mmFR]

k : weighting factor of evaluative individual characteristics [-]

n : number of individual characteristics evaluated [-]

W : cigarette weight [mg]

W_s : cigarette weight being optimized by new model [mg]

W_{sw} : cigarette weight being optimized by Wochnowski model [mg]

y : quality data of evaluative individual characteristics

하첨자

i : ith evaluated individual characteristic

0 : before expansion or fluctuations in filling power

참고문헌

- James, G. A.: U. S. Patent, 3,753,440(1973).
- Robert, G. A., Edward, J. D. and John, W. M.: U. S. Patent, 3,771,533(1973).
- Ziehn, K. D. and Pinneberg, F.: U. S. Patent, 4,577,646(1986).
- 유광근, 김기환: "담배과학총설", 한국연초학회, 제일문화사(1987).
- 김병구 등: 담배연구논문집, 11, 265(1994).
- Cahill, M. J.: "Proceedings of Coresta Symposium", 429(1986).
- Cahill, M. J.: "Proceedings of Coresta Congress", 165(1994).
- Funke, P.: Coresta Meeting Smoke-Techno Groups, Budapest, abstr. ST22(1993).
- Wochnowski, W. F. K.: *Tobacco Journal International*, 6/89, 400 (1989).
- Edgar, T. F. and Himmelblau, D. M.: "Optimization of Chemical Processes", McGraw-Hill, New York(1989).
- Cheney, W. and Kinacid, D.: "Numerical Mathematics and Computing", Wadsworth Inc., Belmont(1980).
- Cho, I. H. and Yoon, E. S.: *HWAHAK KONGHAK*, 27(3), 237 (1989).
- Eom, T.-I., Kim, I.-W. and Park, S. W.: *HWAHAK KONGHAK*, 33(5), 652(1995).