

셀룰로오스 아세테이트 필터의 특성곡선 예측

김수호* · 임성진 · 김정열 · 신창호 · 이문수 · 김종열

KT&G 중앙연구원
(2005년 11월 10일 접수)

Predicting the Capability Curve of Cellulose Acetate Filters

Soo-Ho Kim,* Sung-Jin Lim, Chung-Ryul Kim, Chang-Ho Shin, Moon-Soo Rhee and
Jong-Yeol Kim

KT&G Central Research Institute,
(Received November 10, 2005)

ABSTRACT : A theoretical model for predicting the capability curve of cellulose acetate filter is derived. The pressure drop is expressed as a function of the filter dimensions, the tow fiber characteristics, the filter weight, the fluid flow rate, and a filter fiber factor. Where, the filter fiber factor is affected by the distribution of the tow fibers within the filter, the relative orientations of the tow fibers, and their cross-sectional shapes. The minimum and maximum fraction of solids in capability curves determined from experimental data. Also, the filter fiber factor is expressed as a function of the filter length, tow fiber length, and tow fiber diameter.

Capability curves predicted by the suggested model in this work correspond well with capability curves by experimental data

Key words : cellulose acetate filter, capability curve, pressure drop

담배 필터 제조를 위한 적절한 셀룰로오스 아세테이트 토우의 선정은 제조된 필터에서 요구되는 제거능과 압력 손실(이하 ΔP)에 의하여 결정된다. 그러나 제거능과 ΔP 는 매우 밀접한 상호작용을 함으로 적정 토우의 선정은 일차적으로 요구되는 ΔP 에 맞는 최적의 토우를 선정하는 것이 우선이다. 이러한 적정 토우의 선정은 다양한 토우들의 특성곡선을 비교함으로써 얻어질 수 있고 또한 최대의 제조 수율과 경제적 이익도 얻을 수 있다. 특성곡선은 특정 토우로부터 만들어진 필터들의 ΔP 와 토

우 중량의 범위를 나타낸다.

따라서 본 연구에서는 국내에서 생산되는 셀룰로오스 아세테이트 필터의 특성곡선을 예측하기 위한 모델 정립과 이 특성곡선을 이용한 최적의 셀룰로오스 아세테이트 토우를 선정하는데 있다.

이론적 고찰

압력손실(ΔP) 예측 모델

필터에서의 ΔP 는 필터의 geometry와 구조 그리

*연락처 : 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

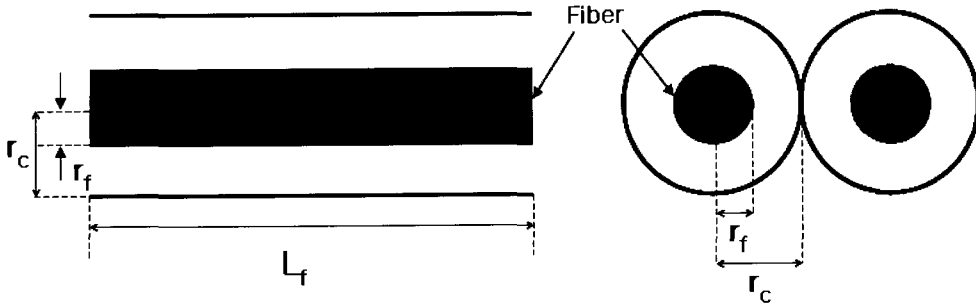


Fig. 1. Filter geometry for predicting pressure drop across a filter.

고 필터내에 흐르는 유체의 흐름장에 영향을 받는다. 이러한 필터의 ΔP 예측 모델은 많은 연구 결과(Kuwabara, S. 1959, Happel, J. 1959, Kirsh. A. A. and N. A. Fuchs 1967)가 발표되었으며, 이중 본 연구에 가장 적절하다고 판단되는 모델은 Langmuir 모델(R.W. Dwyer, 1986)이다. 이 모델에서 ΔP 의 예측식은 Fig. 1에서 보는 바와 같이 필터는 유체의 흐름과 평행한 원통형의 섬유들로 구성되어 있으며, 유체의 흐름은 층류이고 섬유들은 필터내에 일정하게 분포되어 있다고 가정하였다.

Langmuir의 ΔP 예측식은 Fig. 1에 나타난 필터 geometry로부터 필터를 관통하여 흐르는 유체의 흐름에 대한 운동량 수지식으로부터 다음과 같이 유도 될 수 있다(Bird, R.B., W.E. Stewart and E.N. Lightfoot, 1960).

$$\Delta P = \frac{4\pi\mu L_f Q \alpha \phi}{A_f A_F} \quad (1)$$

위 (1) 식은 셀룰로오스 아세테이트 섬유가 원통형이고 유체의 흐름 방향과 평행하며, 필터내에 일정하게 분포되어 있다고 가정하였기 때문에 이를 보정하기 위하여 필터 섬유 계수(B)를 도입하면 다음과 같이 표현 될 수 있다.

$$\Delta P = \frac{4\pi\mu B L_f Q \alpha \phi}{A_f A_F} \quad (2)$$

여기서, ΔP = filter pressure drop (dyne/cm²)

μ = fluid viscosity (g/cm · s)

Q = fluid flow rate (cm³/s)

L_f = length of the filter fibers (cm)

α = fraction of the filter occupied by solids

A_F = cross-sectional area of the filter(cm²)

A_f = cross-sectional area of a filter fiber(cm²)

ϕ = hydrodynamic factor

B = filter fiber factor(related to the shape, orientation, and distribution)

유체역학 계수(ϕ)의 결정

Langmuir의 ΔP 예측식에서 유체역학계수 ϕ 는 필터에서 고체 섬유가 차지하는 부피분율인 충진율 α 의 함수로 (3) 식과 같이 표현된다.

$$\phi = (-\ln\alpha + 2\alpha - \frac{\alpha^2}{2} - \frac{3}{2})^{-1} \quad (3)$$

위 (3) 식은 셀룰로오스 아세테이트 토우로 만들어진 필터들에서 측정되는 α 범위(0.07 ≤ α ≤ 0.20, 필터 기공도 : 0.8~0.93)에서 Fig. 2에 나타난 바와 같이 (4) 식과 같이 간단하게 표현 될 수 있다.

$$\phi = 10.0\alpha \quad (4)$$

이 충진율 범위에서 식 (3)과 (4)에 의한 유체역학 계수의 표준편차는 3 % 미만이므로 유체역학 계수는 (4) 식과 같이 간단하게 표현할 수 있다.

식 (2)의 Langmuir의 ΔP 예측식은 다음의 관계

식들을 이용하여 보다 측정하기 간편한 변수들로 전환될 수 있다.

$$\alpha = \frac{m}{\rho A_F L_F} \quad (5)$$

$$L_f = \frac{m L_d}{D} \quad (6)$$

$$A_f = \frac{d}{\rho L_d} \quad (7)$$

여기서, m = the mass of tow in the filter (g)
 ρ = the density of the tow (g/cm³)
 L_F = the filter length (cm)
 D = the denier of the tow (g/900,000 cm)
 d = the denier of the individual fibers (g/900,000 cm)
 L_d = the characteristic length with which denier is defined (900,000 cm)

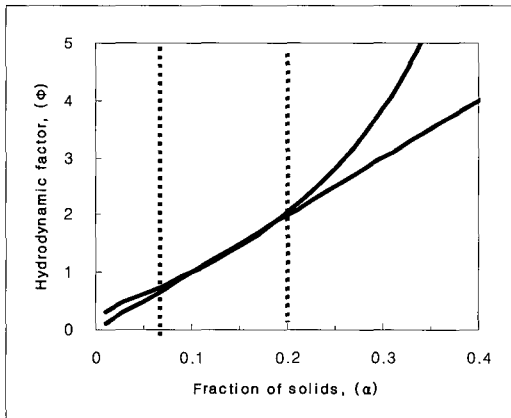


Fig. 2. The hydrodynamic factor(ϕ) as a function of the filter fraction occupied by solids (α)[curved line] ; the straight line is the approximation $\phi=10.0\alpha$ (Eq. 4).

ΔP 예측식은 (4)~(7) 식을 이용하여 다음과 같이 다시 표현 할 수 있다.

$$\Delta P = \frac{40 \pi \mu L_d^2 B Q m^3}{\rho A_F^3 L_F^2 d D} \quad (8)$$

위의 식에서 필터의 단면적을 둘레 항으로 변환하면 ΔP 는 다음과 같다.

$$\Delta P = \frac{2560 \pi^4 \mu L_d^2 B Q m^3}{\rho C_F^6 L_F^2 d D} \quad (9)$$

이러한 ΔP 예측 모델은 여러 연구자들 (Kuwabara, S. 1959, Happel, J. 1959, Kirsh. A. A. and N. A. Fuchs 1967)에 의하여 제안 되었는데 그 중 Keith(Keith, C. H. 1975)와 Rasmussen (Rasmussen, G. T. 1982)은 수직과 수평 흐름장의 선형 조합에 기초한 셀룰로오스 아세테이트 필터의 ΔP 예측 모델을 제안하였다. 그들의 모델에서는 필터 내에 분포하는 섬유들의 분포가 일정하지 않다는 것을 설명하기 위하여 “agglomeration factor”을 도입하였다.

위의 (9)식은 필터의 체원(C_F, L_F), 토우의 물성 값(ρ, D, d), 토우의 질량(m), 유체의 부피 유속(Q) 그리고 필터 섬유 계수(B)의 함수로 표현된다. 따라서 B 값을 안다면, ΔP 는 주어진 필터 체원에 대하여 부피 유속과 토우 질량의 함수로 계산될 수 있다.

재료 및 방법

본 연구에서 가장 중요한 문제는 실측값에 유사한 압력손실(ΔP)을 예측하기 위한 모델식을 결정하는데 있다. 즉, 특성곡선에 대한 많은 실측값으로부터 정확한 필터 섬유 계수(B) 관계식과 최소점과 최대점에서의 충전율(α) 관계식을 결정하는데 있다. 따라서 이들 관계식을 결정하기 위한 실험을 수행하였으며, 이때 사용된 셀룰로오스 아세테이트 토우는 실험 설계법에 의하여 Table 1에 보는 바와 같이 12종의 토우를 선정하였다.

이들 토우 item들을 사용하여 특성곡선 예측에 필요한 계수(B, α)를 결정하기 위하여 국내 필터 회사에서 각 토우 item에 대하여 최소 및 최대 흡인저항값을 갖도록 필터를 제조 하였다. 이때 사용된 필터 제조기는 Hauni사의 KDF-2이며, 생산속도는 3,500 rod/96 mm이다.

Table 1. Tow items used experiment for predicting the capability curve of cellulose acetate filters

Sample No.	Tow Item	Manufacturer	Filter Cir.
1	1.9/35000/Y	SK	24.2
2	1.9/40000/Y	SK	24.2
3	1.9/45000/Y	SK	24.2
4	2.7/35000/Y	SK	24.2
5	2.7/40000/Y	SK	24.2
6	2.7/45000/Y	SK	24.2
7	3.3/35000/Y	SK	24.2
8	3.3/36000/Y	Voridian	24.2
9	3.3/37000/Y	Mitsubishi	24.2
10	3.5/35000/Y	SK	24.2
11	3.5/40000/Y	SK	24.2
12	3.5/45000/Y	SK	24.2

결과 및 고찰

필터 섬유 계수(B)

이론적으로 필터 섬유 계수(B)는 앞서 설명한 바와 같이 셀룰로오스 아세테이트 섬유의 필터 내 방향과 분포 그리고 섬유 단면 모양의 함수이다. 이 계수는 (2) 식에서 토우 질량을 제외한 모든 변수들에 독립적이다. 다시 말해 B는 필터 내 존재하는 토우 섬유의 질량의 함수이다. 필터 내 섬유의 질량은 식 (5), (6)과 같이 필터 길이와 섬유 길이의 함수로 표현된다. 또한 토우 특성곡선에서 토우 질량 범위의 최소점에서 토우 섬유의 길이(L_f)는 필터 길이(L_F)보다 약 10 % 정도 길며, 질량 범위의 최대점에서는 약 100 % 정도 더 긴 것으로 알려져 있다(R. W. Dwyer 1986). 따라서 필터 섬유 계수(B)와 필터 길이 및 섬유 길이의 관계를 알아보기 위하여 국내 필터 회사에서 제조된 L_F = 9.60 cm, C_F = 2.42 cm(필터 권지 포함), Q = 17.5

cm/s, d = 1.9~4.0, D = 35,000~45,000인 필터들에 대하여 각각 ΔP와 중량을 측정하고 (9) 식으로부터 B, (6) 식으로부터 섬유 길이(L_f)를 각각 계산하였다. Fig. 3에서 보는 바와 같이 필터 섬유 계수(B)는 필터길이(L_F)/섬유길이(L_f)와 선형관계에 있는 것으로 나타났으며, 그 관계식은 (10) 식과 같다.

$$B = 0.7871 \frac{L_F}{L_f} + 0.2179 \quad (10)$$

(10) 식에 (6) 식을 대입하면 다음과 같이 쓸 수 있다.

$$B = 0.7871 \frac{L_F D}{m L_d} + 0.2179 \quad (11)$$

식 (9)와 (11)을 이용하여 계산된 ΔP와 측정된 ΔP 값을 비교하면 단사섬유 섬도(mono denier, d)가 작은 필터는 계산값이 측정값보다 약간 높게 나타나는 반면, 단사섬유 섬도(mono denier)가 큰 필터는 계산값이 측정값보다 약간 낮게 나타난다. 따라서 이를 보정하기 위해서는 단사섬유 섬도(mono denier)에 따른 필터 섬유 계수(B)의 수정이 필요하다. 필터 섬유 계수(B)는 필터내 섬유 질량의 함

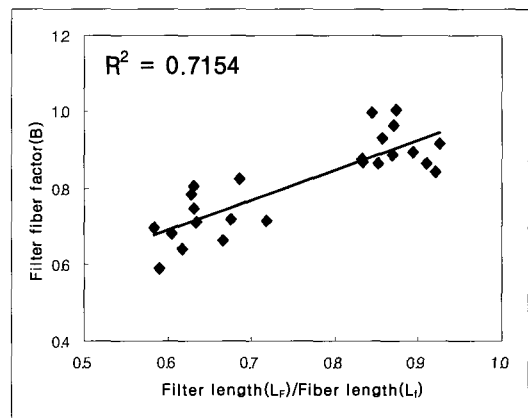


Fig. 3. The relationship between the filter fiber factors(B) and filter length(L_F)/fiber length(L_f) (filter length : 9.6 cm, filter circumference : 2.42 cm).

수이므로 모델식에서 가정한 섬유 모양, 즉 섬유 직경에 대한 고려가 필요하다. 섬유의 직경은 식 (7)에서와 같이 단사섬유 섬도(mono denier)의 제곱근에 비례한다.

Fig. 4에는 필터 섬유 계수(B)와 필터길이, 섬유 길이 및 단사섬유 섬도(mono denier) 제곱근의 관계를 나타내었으며, 이들의 관계는 (12) 식과 같은 선형관계를 나타내었다.

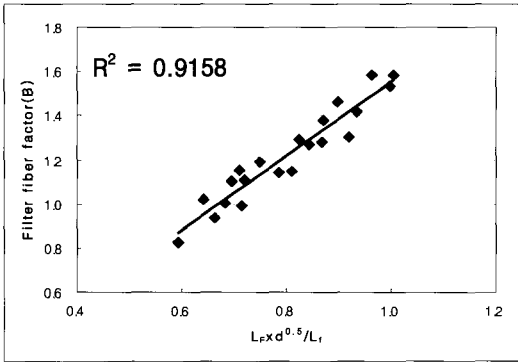


Fig. 4. The relationship between the filter fiber factors(B) and $(L_F \cdot d^{0.5})/L_f$ (filter length : 9.6 cm, filter circumference : 2.42 cm).

$$B = 1.6860 \frac{L_F D d^{0.5}}{m L_d} - 0.1303 \quad (12)$$

필터내 토우의 충전율(α)

특성 곡선의 최소점과 최대점을 예측하기 위해서는 이들 각각에서의 최소 토우 질량(m_{min})과 최대 토우 질량(m_{max})을 알아야 한다. 따라서 Fig. 5 에는 국내에서 제조된 12종의 필터에 대한 토우의 최소 충전율(α_{min}) 및 최대 충전율(α_{max})과 섬유속 섬도(total denier, D)의 관계를 나타내었다.

Fig. 5에서 보는바와 같이 충전율과 섬유속 섬도(total denier)의 관계는 선형관계를 나타내고 있으며, 각각의 관계식은 (13), (14) 식과 같다.

$$\alpha_{min} = \frac{D}{1.884 \times 10^6} + 0.009107 \quad (13)$$

$$\alpha_{max} = \frac{D}{1.460 \times 10^6} + 0.05579 \quad (14)$$

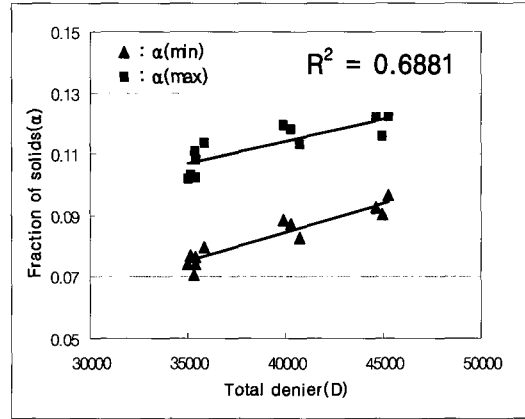


Fig. 5. The relationship between the fraction of solids(α) and total deniers(filter length : 9.6 cm, filter circumference : 2.42 cm).

따라서 최소 중량(m_{min})과 최대 중량(m_{max})은 (12), (13) 식을 (5) 식에 대입하여 결정 할 수 있다.

필터 특성곡선 예측

특성곡선은 특정 토우를 사용하여 필터 제조기로 만들 수 있는 필터들의 최대, 최소의 ΔP 와 토우 중량의 범위를 나타낸다. 따라서 특정 토우에 대한 특성곡선을 예측하기 위해서는, 첫째 (13), (14) 식으로부터 최소 충전율(α_{min})과 최대 충전율(α_{max}) 값을, 둘째 (5) 식으로부터 특성곡선의 중량 범위를 결정한 다음, 셋째 (12) 식으로부터 필터 섬유 계수(B)를 계산하여, 넷째 (9) 식의 ΔP 예측 모델식으로부터 압력 손실 범위를 결정하여 예측 할 수 있다.

필터의 둘레가 2.42 cm이고 길이가 9.6 cm이며, 2.7/35,000/Y의 토우로 제조된 필터의 특성곡선 예측을 위해서는 우선 필터내에서 토우가 차지하는 순수한 둘레를 계산하여야 하며, 이는 다음의 (15) 식과 같다.

$$C_F = C_F^* - 2\pi t \quad (15)$$

여기서, C_F^* = finished circumference
 t = plug wrap thickness

따라서 필터권지의 두께가 4.8×10^{-3} cm라면 토우가 차지하는 순수한 둘레는 2.39 cm이다.

따라서 필터 특성 곡선의 최소점과 최대점에서 토우 중량은 (13)과 (14) 식의 총진율(각각 0.078, 0.107)로부터 (5) 식에 의하여 각각 448 mg과 619 mg으로 예측되며, (12) 식으로부터 필터 섬유 계수(B)을 계산하여 (9) 식의 ΔP 예측 모델식에 대입하면 특성곡선의 최소점과 최대점에서의 ΔP 는 각각 235 mmWG와 479 mmWG로 예측된다. 이때 계산에 사용된 변수들의 값은 Table 2(R. H. Perry and D. W. green, 1973)와 같으며, 모델식에 의하여 예측된 특성곡선과 실측에 의한 특성곡선을 Fig. 6에 나타내었다.

Table 2. Parameter for predicting the capability curve of filter

Parameter	Symbol	Value	Unit
Tow density	ρ	1.32	g/cm ³
Tow circumference	C_F	2.39	cm
Finished Filter circumference	C_F'	2.42	cm
Plugwrap thickness	t	0.0048	cm
Filter length	L_F	9.60	cm
Filter surface area	A_F	0.4545	cm ²
Fluid viscosity (at 20°C)	μ	0.000183	g/cm·s
Denier length	L_d	900000	cm
Fluid flow rate	Q	17.5	cm/s

Fig. 6에서 보듯이 본 연구에서 제안된 모델식에 의하여 예측된 특성곡선과 실측 특성곡선이 매우 잘 일치하는 것으로 나타났으며, ΔP 와 토우 중량의 오차 범위는 각각 1.79~3.71, 0.90~1.65 %로 토우 선별 프로그램을 위한 모델식으로 적절할 것으로 기대 된다.

Fig. 7에는 토우 종류별로 국내에서 제조된 필터

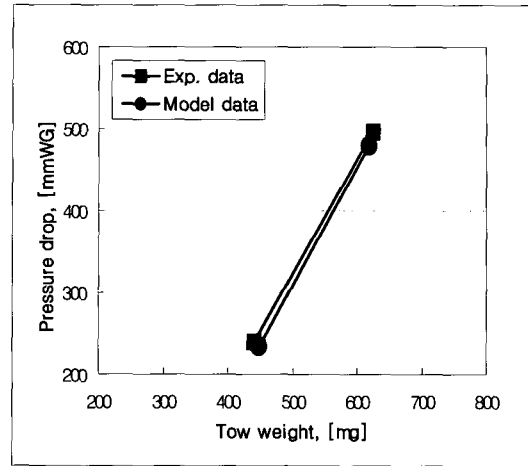


Fig. 6. Experimental and predicting the capability curve for cellulose acetate tow of 2.7/35000/Y.

의 특성곡선 실측값과 본 연구에서 제안된 모델식 및 외국 토우 회사에서 개발된 토우 선별 프로그램(Voridian Tow Selector III, Version 3.2, 2004, Cigarette Filter Simulation V. 1.2.3, TOWPLUS V. 2.0, 2002, Tow Selection system V. 2.1, 1999)과의 비교를 나타내었다. Fig. 7에서 보는 바와 같이 실측값과 모델식에 의한 특성 곡선 예측값은 잘 일치(ΔP 와 토우 중량의 최대 오차 : 3.71, 3.64 %)하는 것으로 나타났지만 단사섬유 섬유도(mono denier)가 작아질수록, 즉 섬유의 직경이 작아질수록 편차가 점점 더 커지는 것으로 나타났다. 이러한 현상은 모델식에 사용된 총진율(a) 관계식이나 필터 섬유 계수(B)를 구하기 위해 사용된 실험 데이터가 충분하지 않아 정확한 계수를 구하지 못했기 때문이다. 본 연구에서는 이들 계수를 구하기 위해서 12종의 서로 다른 토우로 필터를 제조하였으며, 이들 실험값으로부터 관련 계수를 구하였다. 따라서 향후 많은 실험 데이터가 축적 된다면 보다 정확한 특성곡선을 예측 할 수 있을 것으로 기대된다.

또한 4종의 외국 프로그램과 비교한 결과 상당한 차이(ΔP 와 토우 중량의 최대 오차 : VTS-3 ; 14.98, 7.40 %, Acordis ; 20.51, 7.78 %, Towplus ; 21.20, 12.04 %, Mitsubishi ; 28.36, 14.13 %)가

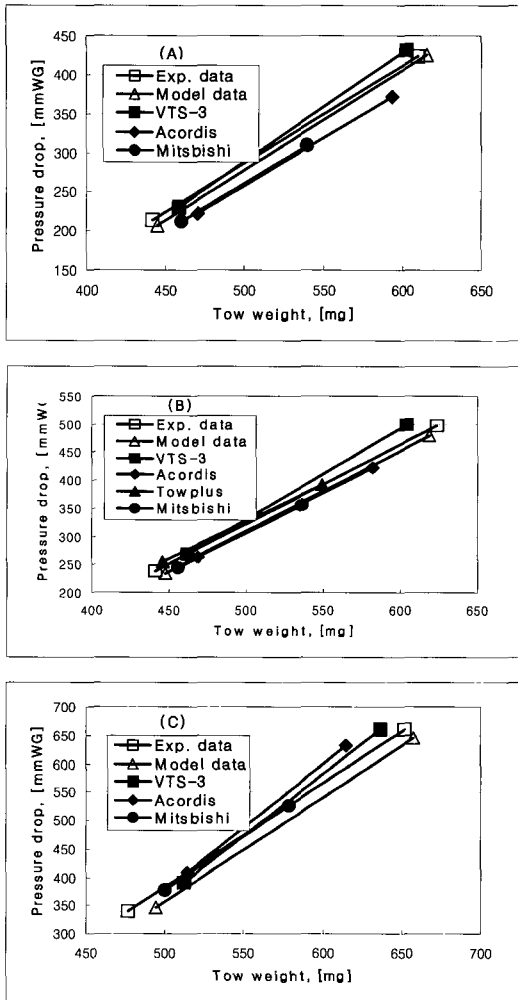


Fig. 7. Comparison of experimental and predicting capability curve with tow selection program for cellulose acetate tow items ; (A) 3.3/35000/Y, (B) 2.7/35000/Y, (C) 1.9/40000/Y. (Filter Length : 9.6 cm, Filter circumference : 2.42 cm).

있는 것으로 나타났다. 이러한 결과는 외국의 프로그램은 각국의 실정에 맞게 개발되었기 때문이며, 특성곡선은 필터를 제조하는 필터 제조기나 제조 기술자의 숙련도, 그리고 필터의 원료인 셀룰로오스 아세테이트 토우의 물성에 따라 상당한 차이를 보여주기 때문이다.

결론

본 연구에서는 국내에서 생산되는 셀룰로오스 아세테이트 필터의 압력손실(ΔP)을 예측하기 위한 모델식으로 Langmuir 모델을 사용하였으며, 모델식은 다음과 같다.

$$\Delta P = \frac{2560 \pi^4 \mu L_d^2 B Q m^3}{\rho C_F^6 L_F^2 d D} \quad (9)$$

위 식에는 압력손실(ΔP)과 관련된 모든 변수들, 즉 필터 제원, 토우 섬유 물성 그리고 유체에 관련된 변수들을 포함하고 있다. 또한 제조된 필터의 특성곡선 예측시 중요한 토우 섬유의 질량과 섬유의 방향성 및 분포에 관한 필터 섬유 계수를 포함하고 있다.

특성곡선에서 최소점과 최대점에서의 토우의 질량은 실험을 통하여 (13), (14) 식과 같이 최소 충진율(α_{\min}) 및 최대 충진율(α_{\max}) 관계식을 결정하여 (5) 식에 대입하여 결정하였다.

$$\alpha_{\min} = \frac{D}{1.884 \times 10^6} + 0.009107 \quad (13)$$

$$\alpha_{\max} = \frac{D}{1.460 \times 10^6} + 0.05579 \quad (14)$$

또한 모델식에서 필터 섬유 계수는 제조된 필터의 길이와 섬유 길이 및 섬유 직경과의 관계로부터 (12) 식과 같이 결정하였다.

$$B = 1.6860 \frac{L_F D d^{0.5}}{m L_d} - 0.1303 \quad (12)$$

모델식에 의하여 예측된 특성곡선과 실측에 의하여 작성된 특성곡선은 비교적 잘 일치하였다.

참고 문헌

- Bird, R. B., Stewart, W. E. and Lightfoot, E. N. (1960) Transport phenomena. John Wiley & Sons, N.Y., pp. 34-54.
- Cigarette Filter Simulation V. 1.2.3, Mitsubishi

- Rayon Co. Ltd.
- Dwyer, R. W.(1986) Predicting the pressure drops across cellulose acetate filters. *Beitr. Tabakforsch. Int.* 13(4): 157-168.
- Happel, J.(1959) Viscose flow relative to arrays of cylinder. *Am. Inst. Chem. Eng. J.* 5: 174-177.
- Keith, C. H.(1975) Experimental and theoretical aspects of cigarette smoke filtration; in: Removal of trace contaminants from the air. edited by V. R. Deitz, American Chemical Society, Washington, D.C. pp 79-90.
- Kirsh, A. A. and Fuchs, N. A.(1967) Studies on fibrous aerosol filters, II. Pressure drops in systems of parallel cylinders. *Ann. Occup. Hyg.* 10: 23-29.
- Kuwabara, S.(1959) The forces experienced by randomly distributed parallel circular cylinders or spheres in a viscous flow at small Reynolds numbers. *J. Phys. Soc. Jpn.* 14: 527-532.
- Perry, R. H. and Green, D. W.(1973) Perry's Chemical Engineers' Handbook. McGraw-Hill International Editions, 5th Edition, pp. 3-24.
- Rasmussen, G. T.(1982) Pressure drop generation in cigarette filters. presented at the CORESTA 1982 Symposium, Winston-Salem, North Carolina, U.S.A., CORESTA Information Bulletin 1982, special issue, p. 29.
- Tow Selection system V. 2.1(1999) Acordis Acetate products.
- TOWPLUS Cigarette Filter Design Software Program V. 2.0(2002) Celanese Acetate Co. Ltd.
- Voridian Tow Selector III, Version 3.2(2004. 10) A filter calculation and tow selection tool from Voridian. a division of Estman Chemical Company.