

절곡필터에서의 압력강하 및 유동특성에 관한 수치적 연구

A Numerical Study on Pressure Drop and Flow Characteristics in Pleated Filters

이 재 현*, 정 상 호**, 조 상 준***, 김 광 영****
 Jae-Heon Lee, S.H.Chung, S. J. Cho, K.Y. Kim

ABSTRACT

Pressure drop and flow characteristics through a filter medium have been investigated numerically. A basic model similar to the filter employed in a hard disk drive was established so that the inflow velocity was 0.1 m/s and the box size was 40mm x 50mm x 30mm. The filter medium specifications were 0.38mm of thickness, $1\mu\text{m}$ of fiber diameter, 0.05 of packing density. And the filter medium was pleated by 10 within the filter box. Twenty-one sets of calculation were performed with different inlet velocities, pleated numbers, and packing densities from the basic model.

As the result, it was found that the velocity after filter medium had maximum value at the rear of the upstream pleated line, but had minimum value at the rear of the downstream pleated line. This made the velocity distribution have sinusoidal form immediately after the filter medium. As the inlet velocity increased, the pressure drop increased linearly. But as the packing density increased the pressure drop increased quadratically.

기 호 설 명

A_c : 계산영역에서의 유동단면적 (cross sectional area)	H : 필터박스의 높이
C : 여재의 충전율 (packing density)	N_p : 절곡수 (pleated number)
C_1 : 주어진 필터에서 여재의 종류 및 여재 두께에 관한 상수	P : 무차원 압력
D : 필터박스의 깊이	ΔP^* : 유차원 압력강하
d_f : 섬유질 직경 (fiber diameter)	P_w : 계산영역에서의 습윤길이 (wetted perimeter)
D_h : 특성길이, 수력직경 (hydraulic diameter)	Re : 레이놀즈수 (Reynolds number, $=\rho U_\infty D_h/\mu$)
	S_u : X 방향 무차원 싱크항
	S_v : Y 방향 무차원 싱크항
	t : 무차원 여재의 두께

* 한양대학교

** 한양대학교 대학원

*** 한국기계연구소 공기조화 연구실

**** ㈜ 신성기술연구소

- U : 무차원 X 방향의 속도
- U_f^* : 면속도 (face velocity)
- U_o^* : 수직여재내의 평균유속
- U_∞ : 자유흐름속도 (=유입속도), 특성속도
- V : 무차원 Y 방향의 속도
- W : 필터박스의 폭
(그리스 문자)
- ρ : 공기의 밀도
- μ : 공기의 점성계수
- β : 여재의 투과율 (porosity)
- θ : 절곡각 (pleated angle)
(상첨자)
- * : 유차원량을 나타냄.
(하첨자)
- f : 수직여재를 나타냄.

1. 서 론

필터의 설계에 있어서 가장 중요하게 고려되어야 할 주요사항으로서는 여과효율, 처리풍량 및 필터전후의 압력강하 등을 들 수 있다. 이 중에서 여과효율은 목적에 알맞은 여재 (filter medium)를 선택하여 손상 및 누설이 없도록 제작작업을 수행함으로써 해결될 수 있을 것이다. 그러나, 일반적으로 유체의 여재통과면적을 넓힌 확대여재를 사용하는 필터에서는 압력강하를 최소한으로 유지시키면서 처리풍량을 최대화하는 것을 목표로 하고 있다.¹⁾

필터가 이용되는 장치로서 예를들면, 반도체 제조 원가중 클린룸에서의 동력비가 30% 정도 차지하며 이 동력비의 70%가 필터설비에서의 압력강하에 의한 송풍동력비이다. 따라서 원하는 풍량을 공급하면서 송풍동력비의 절감을 위해서는 필터에서의 압력강하를 절감시켜야 하는 당위성이 대두된다. 필터에서의 압력강하는 대부분 여재의 접혀진 형상에 따른 구조적 저항을 포함하는 공기유동 저항에 의하여 발생되며, 약간의 압력강하가 필터박스 표면에 의한 저항 및 여재를 필터박스에 장착하여 밀봉하는데 사용하는 밀봉제에 의한 저항으로 인해 발생된다. 따라

서 제한된 공간에서 여재를 어떻게 배열하여야 하는가 하는 구조적인 문제가 필터에서의 압력강하를 결정하는 중요한 인자로 대두된다.²⁾

본 연구에서는 개인용 컴퓨터의 하드 디스크 드라이브에 내장되어 있는 폭×높이×깊이가 40mm×50mm×30mm 정도인 필터박스를 기준모델로 설정한 후 필터박스로 유입되는 공기의 속도 변화에 따른 필터에서의 압력강하, 여재의 성질 변화에 따른 필터에서의 압력강하, 그리고 여재의 접혀진 형상에 따른 필터에서의 유동특성과 압력강하를 예측하였다. 수치계산에서의 변수는 유입속도, 충전율 (packing density) 및 절곡수 (pleated number)로 선택하였으며 필터박스의 크기, 여재의 두께 (filter medium thickness) 및 섬유질 직경 (fiber diameter)은 일정하게 정의하였다.

2. 수치해석 모델의 설정

Fig. 1은 본 연구에서 채택한 기준 모델을 3차원적으로 나타낸 그림이다. 폭 W , 높이 H , 깊이 D 인 필터박스내에 절곡각 (pleated angle) θ 로 N_p (그림에서는 $N_p=4$ 임)개 접힌 여재가 있으며 필터를 향하여 공기가 U_∞ 의 속도로 유입되고 있다. 필터박스내의 여재는 균일하게 절곡각 θ 로 주름잡혀 있고 절

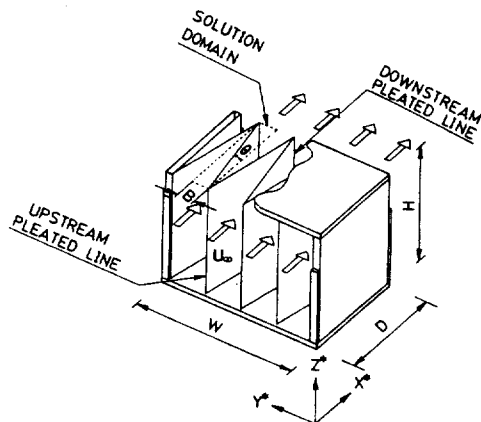


Fig. 1 Schematic of a filter box

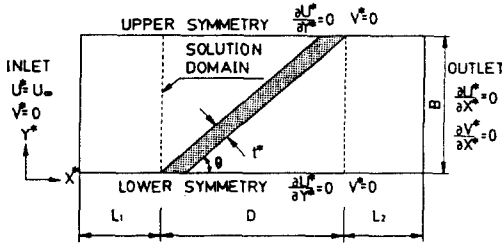


Fig. 2 Two-dimensional sketch of computation domain including solution domain

곡선 (pleated line)은 Y^* 방향으로 반복하여 형성된다. 따라서 필터박스내의 유동은 절곡선을 지나는 수직면에 대칭이며 Y^* 방향으로 동일한 물리적 거동이 반복된다고 할 수 있다. 이에 따라 관심영역에서의 유동 및 압력강하는 Fig. 1에 점선으로 표시된 전형적인 크기인 $D \times B$ 의 계산영역에 의해 대표될 수 있으며 이를 확대하여 Fig. 2에 자세히 나타내었다. D 는 유입된 공기가 두께 t^* , 절곡각 θ 인 여재를 지나는 X^* 방향 길이이며, B 는 여재를 Y^* 방향으로 투영한 길이이다. L_1 길이의 추가적인 유로는 여재의 존재로 인한 유입구 부근의 유동특성을 알기 위하여 설정되었으며, 유출구 부근에서 유동특성을 알기 위하여 또하나의 추가적인 유로 L_2 를 설정하였다.

3. 지배방정식

필터내부에서의 공기의 밀도 및 점성계수는 일정하며 유동은 2차원적인 것으로 가정하여 수치해석을 수행하였으며 이러한 가정하에서 여재의 저항에 의한 운동량 싱크 항 (momentum sink term)을 포함한 2차원 비압축성 층류유동을 기술하는 무차원 연속방정식과 무차원 운동량 방정식은 아래와 같다.

연속방정식

$$\partial U / \partial X + \partial V / \partial Y = 0 \dots\dots\dots (1)$$

운동량 방정식

$$U(\partial U / \partial X) + V(\partial U / \partial Y) = -(\partial P / \partial X) + (1/Re)\{\partial^2 U / \partial X^2 + \partial^2 U / \partial Y^2\} - S_u \quad (2)$$

$$U(\partial V / \partial X) + V(\partial V / \partial Y) = -(\partial P / \partial Y) + (1/Re)\{\partial^2 V / \partial X^2 + \partial^2 V / \partial Y^2\} - S_v \quad (3)$$

상기 무차원 미분방정식에서 사용된 무차원 수 및 무차원 변수의 정의는 아래와 같다.

$$X = X^* / D_h, Y = Y^* / D_h, t = t^* / D_h, U = U^* / U_\infty, V = V^* / U_\infty, P = P^* / \rho U_\infty^2, Re = \rho U_\infty D_h / \mu \dots\dots\dots (4)$$

여기서 상첨자 *는 유차원 값을 표시하며 D_h 및 U_∞ 는 각각 특성길이 및 특성속도이다. 특성속도는 편의상 유입공기속도 U_∞ 를 선택하였으며 특성길이는 수력직경 (hydraulic diameter) D_h 를 선택하였다. Re, ρ, μ, t, U, V 그리고 P 는 각각 레이놀즈수 (Reynolds number), 공기의 밀도, 공기의 점성계수, 여재의 무차원 두께, X 방향의 무차원 속도, Y 방향의 무차원 속도, 그리고 무차원 압력이다. 특성길이로 사용된 수력직경 D_h 는 아래식과 같이 정의된다.

$$D_h = 4 A_c / P_w \dots\dots\dots (5)$$

여기서 A_c 는 계산영역에서의 유동 단면적 (cross sectional area)이며 P_w 는 계산영역에서의 습윤길이 (wetted perimeter)이다.

Fig. 1과 Fig. 2에서 고려된 계산영역에 대한 수력직경은 다음과 같이 표현될 수도 있다.

$$D_h = 2W / (2N_p + W/H) \dots\dots\dots (6)$$

상기 지배방정식과 함께 정의되는 무차원 경계조건은 다음과 같으며 각 유차원 경계조건은 Fig. 2에도 나타내었다.

$$U = 1, V = 0 \text{ at } X = 0 \\ \partial U / \partial Y = V = 0 \text{ at } Y = 0, Y = B / D_h \\ \partial U / \partial X = \partial V / \partial X = 0 \text{ at } X = (L_1 + D + L_2) / D_h \quad (7)$$

3.1 운동량 싱크항의 처리

식 (2)와 (3)에 나타나는 운동량 싱크항인 S_u, S_v 는 여재저항에 의한 특별한 압력강하로 볼 수 있으며 아래와 같이 나타낼 수 있다.⁹⁾

$$S_u = |(\partial P / \partial X)_f| (1 - \beta) / C,$$

$$S_v = |(\partial P / \partial Y)_f| (1 - \beta) / C \dots\dots\dots (8)$$

여기서 $(\partial P / \partial X)_f$ 및 $(\partial P / \partial Y)_f$ 는 각각 수직여재 ($\theta = 90^\circ$)에서 X 방향으로의 압력구배 및 Y 방향으로의 압력구배를 나타낸다. 여재의 특성을 나타내는 C 와 β 는 각각 충전율 (packing density) 및 투과율 (porosity)로 정의된다. C 는 여재에서 섬유질이 차지하는 체적비율이며, $\beta = 1 - C$ 이다.⁴⁾ 따라서 여재가 있으면 $S_u = |(\partial P / \partial X)_f|$ 및 $S_v = |(\partial P / \partial Y)_f|$ 이며 여재가 없으면 $S_u = S_v = 0$ 이다.

절곡된 여재를 통과하는 유동을 해석하기 위하여서는 $(\partial P / \partial X)_f$ 및 $(\partial P / \partial Y)_f$ 의 구체적인 표현이 필요하다. Raber⁵⁾에 따르면 수직필터에서의 압력강하는 아래와 같이 나타낼 수 있다.

$$\Delta P^* = C_1 \mu U_f^* \dots\dots\dots (9)$$

여기서 C_1 은 주어진 필터여재의 종류와 여재두께에 따르는 상수, μ 는 공기의 점성계수, 그리고 U_f^* 는 여재표면에 수직한 방향으로 유입되는 공기속도를 나타내는 면속도 (face velocity)이다.

Davies⁶⁾에 의하면 수직여재내의 평균유속 U_o^* 는 아래와 같이 주어진다.

$$U_o^* = U_f^* / (1 - C) \dots\dots\dots (10)$$

여재가 $\beta > 0.9$ 인 높은 투과성을 갖는다고 가정하면 상기식은 아래와 같다.

$$U_o^* \cong U_f^* \dots\dots\dots (11)$$

그러므로 수직여재의 단위두께당 압력강하는 아래와 같이 쓸 수 있다.

$$|(\partial P^* / \partial X^*)_f| \cong \Delta P^* / t^*$$

$$= C_1 \mu U_f^* / t^* \cong C_1 \mu U_o^* / t^* \dots\dots\dots (12)$$

유동의 연속성에 의해서 여재를 통과하는 극소속도 $U^*(X^*)$ 는 평균유속 U_o^* 와 같다. 따라서 단위두께당 압력강하는 아래와 같이 쓰여질 수 있다.

$$|(\partial P^* / \partial X^*)_f| = C_1 \mu U^*(X^*) / t^* \dots\dots\dots (13)$$

상기 수직필터에서는 X^* 방향속도만 존재하 이 와 같은 논의는 2차원 유동에도 확장 시킬 수 있다. 따라서 수직필터와 동일한 재료로 만들어진 본 연구에서 채택한 여재주위에서의 압력강하구배는 아래와 같이 쓸 수 있다.

$$|(\partial P^* / \partial X^*)_f| = C_1 \mu U^*(X^*, Y^*) / t^* \dots\dots\dots (14)$$

$$|(\partial P^* / \partial Y^*)_f| = C_1 \mu V^*(X^*, Y^*) / t^* \dots\dots\dots (15)$$

여기서 $U^*(X^*, Y^*)$, $V^*(X^*, Y^*)$ 는 필터 내 주어진 위치 (X^* , Y^*)에서의 극소속도이다. 식 (14)와 (15)을 무차원화시키면 운동량 방정식에 나타난 싱크항인 식 (8)은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$S_u = |(\partial P / \partial X)_f| (1 - \beta) / C$$

$$= C_1 D_h (1 - \beta) U / (t Re C) \dots\dots\dots (16)$$

$$S_v = |(\partial P / \partial Y)_f| (1 - \beta) / C$$

$$= C_1 D_h (1 - \beta) V / (t Re C) \dots\dots\dots (17)$$

이제 운동량 싱크항의 적절한 결정을 위하여서는 상수 C_1 값이 결정되어야 한다. Fuchs and Stechkina⁷⁾에 따르면 여재에 관한 Darcy의 법칙은 아래와 같이 쓸 수 있다.

$$\Delta P^* = 16 C t^* \mu U_f^* / \{ d_f^2 (-0.5 \ln C - 0.5) \}$$

$$\dots\dots\dots (18)$$

식 (9)와 식 (18)을 비교하면 상수 C_1 은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$C_1 = 16 C t^* / \{ d_f^2 (-0.5 \ln C - 0.5) \} \dots\dots\dots (19)$$

따라서 충전율 C , 여재두께 t^* , 및 섬유질 직경 d_f 를 알면 C_1 을 결정할 수 있다.

4. 수치해석 방법

방정식 (1)~(3)은 Patankar의 제어체적을 기본으로 하여 이산화 (discretization)시켰으며 해를 구하기 위하여 SIMPLER (Semi - Implicit Method for Pressure-Linked Equation Revised) 알고리즘을 이용하였다.⁸⁾

여재가 있는 부분에서는 여러가지 물리량

의 변화가 급격할 것으로 예측되므로 여재가 존재하는 영역인 D 에서는 조밀한 격자를 구성하였으며 여재가 존재하지 않은 영역인 L_1 과 L_2 영역에서는 이보다 성긴 격자를 구성하였다. 또한 Y 방향으로는 균일한 간격으로 격자를 형성하여 전체계산영역에서는 44×21 개의 격자망을 구성하였다. 계산에서 사용된 하향이완계수는 속도 U, V 에 대해 각 0.3, 0.3이며 압력 P 는 이완시키지 않았다. 본 연구에서 선택된 대부분의 계산 경우에 700~1000 회의 반복계산후에 해가 수렴되었다.

5. 결과 및 고찰

압력강하는 여재의 충진율과 밀접한 관계가 있다. 1976년 Schafer⁴⁾가 균일 분포된 등방향성의 여재를 이용하여 충진율과 무차원 압력강하계수와와의 관계를 실험적으로 나타낸 바 있다. 본 연구에서 채용한 방법의 타당성 검토를 위하여 Fig. 3에는 본 연구의 계산결과를 Schafer의 자료와 비교하였다. 그림에서 횡축은 충진율을 나타내며 종축은 무차원 압력강하계수를 나타낸다. 여기서 보면 압력강하계수는 충진율의 이차함수로 증가됨을 알 수 있으며 이는 Schafer의 실험결과와 좋은 일치를 보인다.

본 수치계산에서는 필터박스의 크기 $W \times H \times D$ 가 $40 \text{ mm} \times 50 \text{ mm} \times 30 \text{ mm}$, 여재 섬유

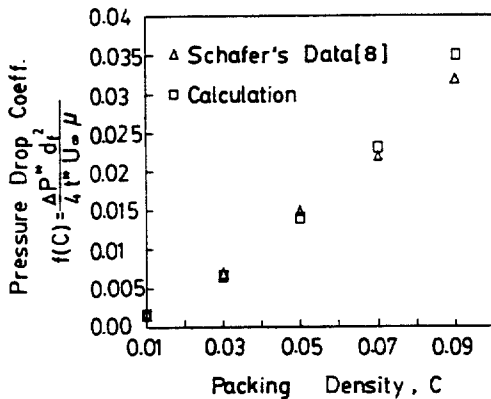


Fig. 3 Comparison of present investigation with Schafer's data⁴⁾

질의 직경 d_f 가 $1 \mu\text{m}$, 여재두께 t^* 가 0.38 mm, 충진율 C 가 0.05, 유입속도 U_∞ 가 0.1 m/s, 그리고 절곡수 N_p 가 10개인 경우를 기준모델로 설정하였으며 각 수치값들은 Table 1에 정리하였다. 이 기준모델과 이로부터 여재 절곡수, 충진율, 그리고 유입속도를 각각 변화시키면서 모두 21개 경우에 압력강하와 유동특성을 예측하였다.

Table 1. Selected data for the basic model

Description	Symbol [unit]	Quantity
Width of filter	W [mm]	40
Height of filter	H [mm]	50
Depth of filter	D [mm]	30
Inlet velocity	U_∞ [m/s]	0.1
Fiber diameter	d_f [μm]	1
Thickness of filter medium	t^* [mm]	0.38
Packing density	C	0.05
Pleated number	N_p	10
Pleated angle	θ [degree]	3.8

5.1 기준모델에 관한 유동특성 및 압력 특성

기준모델로 선정된 필터박스 내부에서 유동특성과 압력특성은 $D \times B$ 가 $30 \text{ mm} \times 2 \text{ mm}$ 크기의 작은 영역에 의하여 대표될 수 있으나 유입구와 유출구의 유동특성을 알기 위하여 설정되는 추가적인 유로의 길이 L_1 및 L_2 가 각각 15mm 및 20mm로 설정된 전체 $65 \text{ mm} \times 2 \text{ mm}$ 의 계산영역에서 유동 및 압력특성을 규명하고자 한다.

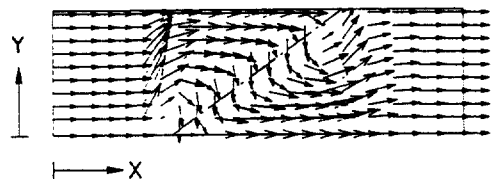


Fig. 4 Distribution of velocity vectors within the computation domain [Y-direction has magnificated by 10 times]

Fig. 4에는 전체계산영역에서 속도벡터의 분포를 나타내었다. 그림에서는 유동특성을 좀더 정밀하게 관찰하기 위하여 Y 방향 폭을 10 배 확대하여 나타내었으며 이하의 논의에서도 이와 같은 방법을 취할 것이다. 입구에서 0.1 m/s 로 유입된 공기는 여재를 만나는 부근에서 여재의 존재로 말미암아 방향을 바꾸어 여재를 따라 흐른다. 대칭적인 유동구조로 인하여 여재를 따라 흐르는 공기는 곧 여재의 수직방향으로 유입되어 여재내부를 통과한다. 여재는 절곡각 3.8°로 기울어져 있으므로 여재의 상류에서는 상부대칭면(upper symmetry, Fig. 2 참조)으로 갈수록 속도는 점점 빨라지며 여재의 하류에서는 하부대칭면(lower symmetry, Fig. 2 참조)으로 갈수록 속도가 빨라진다.

필터박스 전체에서의 유동특성을 잘 나타내기 위하여 Fig. 5에는 실제와 같이 연결된 여재를 통과하는 공기의 거동을 보여준다. 여기서 보면 상류절곡선(upstream pleated line, Fig. 1 참조) 부근의 여재전면(front)에서 유

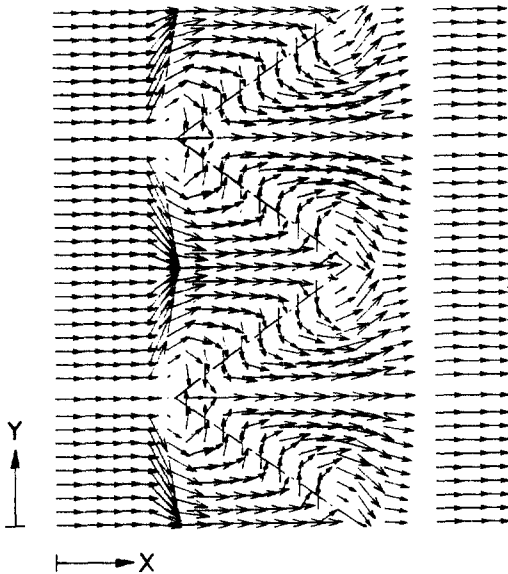


Fig. 5 Distributions of velocity vectors through continuous filter medium (revised to distinguish wavy shape at the end of filter medium) [Y-direction has been magnified by 10 times]

량이 가장 작고 여재후면(rear)에서는 유량이 가장 많다. 하류절곡선(downstream pleated line, Fig. 1 참조) 부근에서는 이와 반대이다. 이에 따라 여재에서 유출되는 공기의 속도는 상류절곡선 위치에서 크고 하류절곡선 위치에서 작은 파형속도분포를 보인다.

여재를 통과하는 공기의 유동 방향을 설명하기 위하여 절곡각이 3.8°인 여재 전후에서의 속도벡터를 Fig. 6에 나타내었다. 그림에서 공기는 여재의 왼쪽에서 유입되어 오른쪽으로 유출되고 있다. 여재의 전체길이를 L, 여재표면과 공기의 유입속도벡터가 반시계방향으로 이루는 각도를 Ω , 그리고 여재의 상류절곡선에서 하류절곡선으로 향하는 좌표 방향을 X'로 정의하였다. 여재의 위치에 따라 공기유동특성이 다를 것으로 예상되므로 대표적인 위치로서 여재의 상류절곡선 영역, 여재의 중앙 영역, 그리고 여재의 하류절곡선 영역의 세가지 소영역을 선택하였으며 그림에서 이 소영역을 ①, ②, ③으로 표시하였다.

여재의 상류절곡선 영역인 소영역 ①에서 보면 상류절곡선 인접 위치에서는 미소한 속도 크기를 가진 공기가 유입유동(inflow) 방향으로 여재에 유입하여 최소의 속도 크기를 가지고 여재내부를 통과하지만 유출할 때는 속도의 크기가 약간 증가되어 유입유동방향으로 유출한다. 그러나 X'가 증가할수록 여재유입속도의 크기는 점점 커지며, 공기는 여재에 거의 수직($\Omega \approx 90^\circ$)하게 유입되어 거

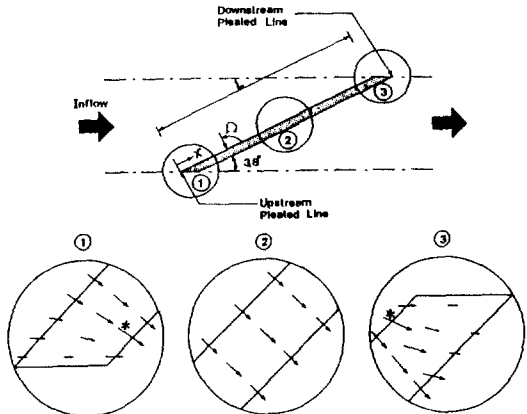


Fig. 6 Flow directions across the filter medium

의 수직하게 유출된다. 또한 공기가 유출될 때 그림에서 *로 표시된 곳에서 속도벡터의 크기가 가장 큰 것은 여재가 하부대칭면에 대하여 3.8° 로 아주 작게 기울어져 있어 이 부분으로 유량이 모이기 때문이다.

여재의 중앙영역인 소영역 ②에서 속도의 크기는 어느 위치에서나 비슷하며 공기는 여재에 거의 수직으로 유입되어 수직으로 여재 내부를 통과하고 수직으로 유출된다. 이는 저항체를 통과하는 유체가 유동저항을 최소로 하는 경로를 취할 것이라는 물리적 예측에 부합되는 것이다.

여재의 하류절곡선 영역인 소영역 ③을 보면, 하류절곡선으로부터 비교적 멀리 떨어진 위치에서는 소영역 ②에 나타난 여재유입속도 크기와 유사한 속도크기를 가진 공기가 여재에 거의 수직으로 유입되어 수직으로 유출된다. 그러나 X'/L 가 증가할수록 여재유입각도 Ω 가 증가되어 공기는 유입유동(inflow) 방향을 따라 여재에 유입되며 여재유입속도의 크기는 그림의 * 위치에서 최대가 된다. 또한 공기가 여재를 유출할 때는 X'/L 가 증가할수록 공기의 여재유출방향은 유입유동방향을 따르게 되며 여재유출속도의 크기는 점점 작아져서 하류절곡선 인접위치에서는 여재유출속도의 크기가 거의 0에 가깝다.

Fig. 7에는 X' 방향으로의 여재의 위치에 따라 공기가 여재로 유입되는 유입각도를 나타내었다. 그림에서 횡축은 전체여재 길이에 L 에 대한 X' 방향 길이의 비 X'/L 를 나타내며 종축은 Fig. 6에서 정의한 여재유입각도 Ω 를 나타낸다. 공기가 여재의 표면을 따라 흐른다면 여재유입각도 Ω 는 180° 에 해당되며 공기가 유입유동방향 그대로 유입된다면 여재유입각도 Ω 는 176.2° 에 해당된다. 그림에서 보면 상류절곡선 영역($X'/L = 0 \sim 0.1$)에서는 X' 가 증가할수록 여재유입각도 Ω 가 176.2° 에서 90° 로 감소한다. 이는 상류절곡선 인접위치에서 공기는 유입유동방향($\Omega = 176.2^\circ$)으로 여재에 유입되지만 X' 가 증가할수록 점점 여재에 거의 수직으로 유입되고 있다는 것을 보여준다. 여재의 대부분의 영역

인 $X'/L = 0.1 \sim 0.95$ 부분에서는 X' 가 증가하여도 여재유입각도 Ω 가 거의 90° 로 일정하여 공기가 여재에 수직하게 유입되고 있음을 보여준다. 여재의 하류절곡선 영역($X'/L = 0.95 \sim 1.0$)에서는 X' 가 증가할수록 여재유입각도 Ω 가 약 90° 에서 176.2° 로 증가하여 하류절곡선에 인접한 위치에서는 공기가 유입유동방향으로 여재에 유입된다는 것을 알 수 있다.

Fig. 8에는 X' 방향으로의 여재위치에 따라 여재표면에 수직한 방향으로 유입되는 무차원 면속도 U_f 를 나타내었다. 여기서 U_f 는 면속도 U_f^* 를 유입유동속도 U_∞ 로 무차원화한 것이다. 그림에서 보면 상류절곡선영역($X'/L = 0 \sim 0.1$)에서는 X' 의 증가에 따라 무차원 면속도 U_f 는 거의 0에서 0.005로 증가한다. 이는 상류절곡선 부근에서는 공기가 여재로 거의 유입되지 않는다는 것을 보여준다.

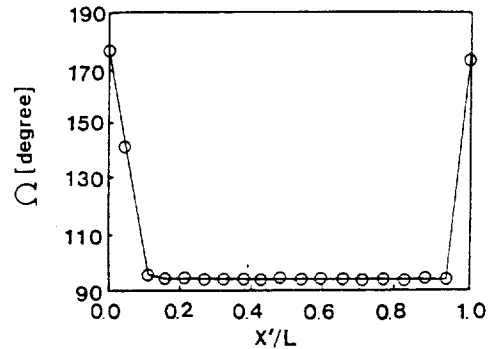


Fig. 7 Inflow angle to filter along the filter surface

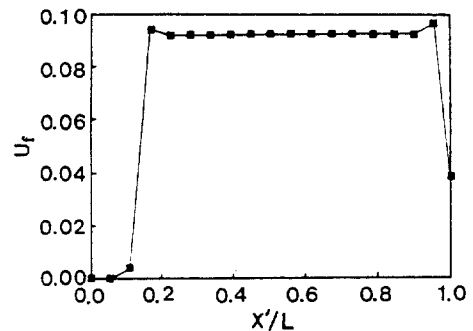


Fig. 8 Dimensionless face velocity along the filter medium

다. 공기가 여재를 따라 올라감에 따라 면속도는 점점 증가하게 되어 여재의 대부분의 영역인 $X'/L = 0.1 \sim 0.95$ 에서는 무차원 면속도 U_f 가 거의 0.09로 일정하다. 그러므로 Fig. 7에서 논의한 공기의 여재유입각도를 고려하면 여재의 대부분의 영역에서 공기는 유입유동속도 U_∞ 에 약 9%의 속도크기로 여재에 수직으로 유입된다는 것을 알 수 있다. 절곡각 $\theta = 3.8^\circ$ 인 기준필터에서는 수직여재(절곡각 $\theta = 90^\circ$)에 비하여 공기가 통과하는 여재의 면적이 15배(= B/L , Fig.1과 Fig. 6 참조)로 증가되므로 단순한 비례식에 의하면 공기의 여재 통과속도는 1/15(6.7%) 정도로 감소될 것으로 예상된다. 그러나, 실제 절곡필터에서는 상·하류절곡선 영역에서의 낮은 속도 때문에 수직여재에 비해서 여재통과속도가 약 9% 정도로 감소되었다고 판단된다. 하류절곡선 영역($X'/L = 0.95 \sim 1.0$)에서는 X' 의 증가에 따라 무차원 면속도 U_f 가 0.096에서 0.04로 감소한다. 또한 $X'/L = 0.95$ 에서 무차원 면속도 U_f 가 0.096으로 가장 커지며 이는 Fig. 6의 ③에 나타난 *위치에 해당된다.

필터박스를 통과함에 따른 압력강하의 대부분은 여재의 존재로 기인된다고 예상되며 이를 Fig. 9의 등압선 분포에서 확인하였다. 그림에서는 유입구와 유출구 사이를 4등분하는 3개의 등압선을 그린 것으로 총압력 차이의 절반에 해당되는 등압선이 정확히 여재의 중앙선에 일치하고 있다. 아울러 필터 양쪽면에 두개의 등압선이 존재하며 이는 대부분의 압력강하가 거의 여재로 인하여 생기고 있음을 보여준다.

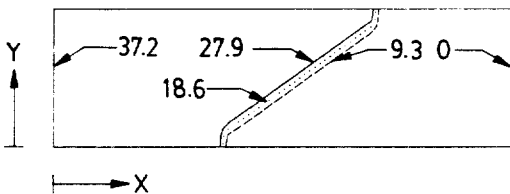


Fig. 9 Distribution of isobarics within the computation domain(unit: Pa) [Y-direction has been magnified by 10 times]

5.2 각 변수의 변화에 따른 압력강하의 변동

유입속도, 절곡수, 그리고 충전율등의 변수가 기준모델로부터 변화할 때에도 5.1에서 기술한 유동특성 및 압력분포의 정성적 경향은 그대로 유지된다.

공학적으로 관심이 있는 것은 상기 변수를 변화시켰을 때 필터박스 전후의 압력강하량이다. 그러므로 이하에서는 각각의 변수가 변함에 따라 나타나는 압력강하량에 관심을 두고자 한다.

5.2.1 유입속도의 변화

기준모델에서 여타의 모든 변수를 고정시키고 필터박스로의 유입속도를 0.01 m/s, 0.05 m/s, 0.1 m/s, 0.15 m/s, 그리고 0.2 m/s로 변화시키면서 산출한 압력강하량을 Fig. 10에 나타내었다. 그림에서 횡축은 유입속도를 나타내고 종축은 압력강하량을 나타내고 있다. 여기서 보면 유입속도가 증가함에 따라 압력강하는 일차적으로 증가하고 있으며 이는 유입속도가 증가함에 따라 여재를 지나는 면속도가 증가하고 이에 따라 유동저항이 커져서 여재전후에서 큰 압력강하를 유발하기 때문이다.

5.2.2 절곡수의 변화

기준모델에서 여타의 모든 변수를 고정시키고 필터박스내의 여재 절곡수를 0개(수직여재), 5개, 10개, 15개, 20개, 40개, 60개, 80개, 100개로 변화시키면서 산출한 필

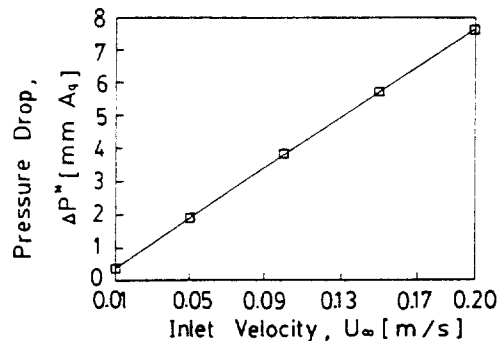


Fig.10 Relationship between inlet velocities and pressure drops(other parameters are fixed as the basic model)

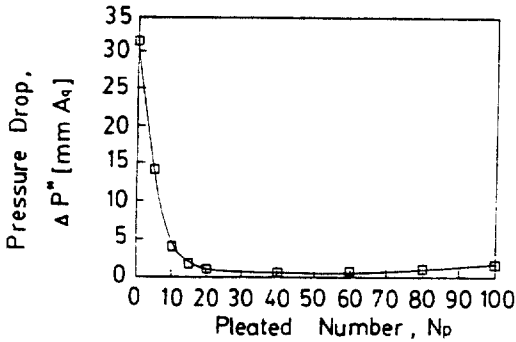


Fig.11 Relationship between pleated numbers and pressure drops (other parameters are fixed as the basic model)

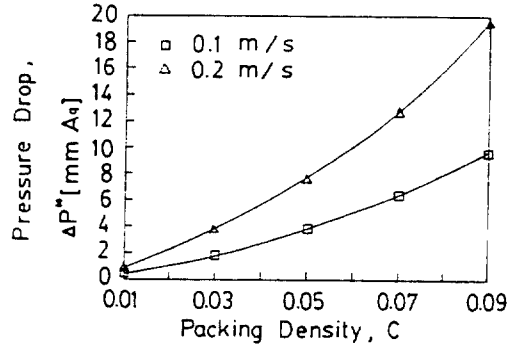


Fig.12 Relationship between packing densities and pressure drops in cases of two velocities (other parameters are fixed as the basic model)

터입구와 출구사이의 압력강하량을 Fig.11에 나타내었다. 그림에서 횡축은 절곡수를 나타내고 종축은 압력강하량을 나타내고 있다. 여기서 보면 10개까지는 절곡수가 증가할수록 압력강하량은 급격히 감소하지만 절곡수가 15개 이상에서는 그 감소율이 줄어든다. 그러나 절곡수가 40개 이상에서는 압력강하량이 약간씩 증가하고 있다. 수직여재 ($N_p = 0$)에서부터 절곡수가 증가할수록 공기가 통과하는 여재면적이 증가되므로 압력강하가 줄어드는 것은 당연하다고 보겠다. 그러나 절곡수가 40개 이상으로 되면 여재의 부피가 필터박스 공간의 76% 이상을 점유하게 되며 이에 따라 필터 자체가 일종의 유동장애물이 되기 때문에 압력강하는 증가하게 된다. 따라서 절곡수가 무한정 많을수록 압력강하가 계속 줄어드는 것은 아니며 최소 압력강하에 해당되는 절곡수가 존재한다는 것을 알 수 있으며 Raber⁵⁾의 견해와도 일치하는 것이다. 본 연구에서는 절곡수가 40개에서 압력강하량이 최소임을 알 수 있다.

5.2.3 충전율의 변화

기준자료에서 여타의 모든 변수를 고정시키고 필터박스의 유입속도가 각각 0.1m/s 및 0.2 m/s로 일 때 충전율은 0.01, 0.03, 0.05, 0.07 그리고 0.09로 변화시키면서 산출한 필터입구와 출구사이의 압력강하량을 Fig. 12에 나타내었다. 그림에서 횡축은 충전율을 나타내며 종축은 압력강하량을 나타내고

있다. 여기서 보면 충전율이 증가할수록 압력강하량은 이차적으로 증가하며 유입속도가 클수록 압력강하량이 더 큰 것을 보여준다. 이는 동일한 유입속도를 갖는 필터에서 여재의 충전율이 클수록 여재내에 섬유질이 많아져서 저항이 증가되고 따라서 압력강하가 증가되기 때문이다. 또한 동일한 충전율을 가진 필터에서 유입속도를 증가시키면 여재를 지나는 면속도가 증가되고 유동저항이 커지므로 보다 큰 압력강하를 일으키는 것은 앞서의 논의(유입속도의 변화)와 일치한다.

6. 결 론

개인용 컴퓨터의 하드 디스크 드라이브에 내장되는 30 mm 깊이 및 절곡각이 3.8° 인 필터를 하나의 기준모델로 설정하고 이 기준 필터로부터 유입속도, 절곡수, 그리고 충전율 등을 각각 변화시키면서 압력강하 및 유동특성을 고찰하여 아래와 같은 결론을 얻었다.

1) 공기유동속도는 여재의 상류절곡선 전면에서는 최소 속도값을 가지며 상류절곡선 후면에서는 최대 속도값을 갖는다. 하류절곡선 전후면에서는 상류절곡선의 경우와는 정반대이다. 이로 인하여 여재출구 영역에서는 파형속도분포를 이룬다.

2) 여재의 상류절곡선 영역($X'/L = 0 \sim 0.1$)에서는 유입유동방향($\Omega = 176.2^\circ$)으로 유입

한 공기는 X' 의 증가에 따라 여재 유입각도 Ω 가 90° 로 근접해간다. 여재의 대부분의 영역인 $X'/L = 0.1 \sim 0.95$ 에서는 여재 유입각도 $\Omega \cong 90^\circ$ 로 공기가 여재에 수직으로 유입한다. 여재의 하류절곡선 영역($X'/L = 0.095 \sim 1.0$)에서는 X' 의 증가에 따라 여재 유입각도 Ω 는 90° 에서 176.2° (유입유동방향)로 증가한다.

3) 여재의 상류절곡선 영역에서는 여재로 유입되는 공기량이 극히 작으며 여재의 대부분의 영역인 $X'/L = 0.1 \sim 0.95$ 에서는 공기가 여재에 수직으로 유입되며 면속도는 유입유동 속도 U_∞ 에 비해 약 9%의 크기를 갖는다.

4) 동일한 여재에서는 유입속도가 증가할수록 압력강하가 유입속도에 일차적으로 증가한다.

5) 절곡수가 증가할수록 압력강하가 감소하지만 절곡수가 어떤 수 이상이면 다시 압력강하가 증가하는 경향을 보인다. 본 연구에서 채택된 기준필터박스의 경우에 가장 낮은 압력강하는 절곡수 40개(절곡각 $\theta = 0.95^\circ$)일 때이다.

6) 충전율이 증가할수록 압력강하는 충전율에 이차적으로 증가한다.

참 고 문 헌

1. 과학기술처, KIMM, 1986. "고성능필터(HEPA FILTER)의 국산화 개발(I)", pp. 114-115.
2. 과학기술처, KIMM, 1989. "CLASS 1 초청정장치의 개발에 관한 연구(I)", p. 141.
3. Faghri, M., Brown, George A., Rao, N., and Borgia, J.A., "Numerical Computation of Flow through Pleated Filters", Farm/Allied Center for Filtration Research University of Rhode Island, pp. 1-23.
4. Faghri, M., Lessmann, R.C., and White C., 1987, "A Preliminary Parametric Study of Three Dimensional Flow Field Modeling to Predict Pressure Drop in Fibrous Filters", ASME 87-WA/FE-8.
5. Raber, and Robert R., 1982, "Pressure Drop Optimisation and Dust Capacity Estimation for a Deep-Pleated Industrial Air Filter Using Small Sample Data", Proceedings of 3rd World Filtration Congress, pp. 508-511.
6. Davies, C.N., 1973, "Air Filtration", Academic Press, London.
7. 과학기술처, KIMM, 1987. "고성능필터(HEPA FILTER)의 국산화 개발(II)", p. 54.
8. Patankar, S.V., 1980, "Numerical Heat Transfer and Fluid Flow", McGraw-Hill, New York.