

단일 채널 DPF의 PM 포집 모델링 및 모델 파라미터의 민감도 해석

정승채¹⁾ · 박종선¹⁾ · 윤웅섭^{*2)}

연세대학교 대학원 기계공학과¹⁾ · 연세대학교 기계공학과²⁾

Rigorous Modeling of Single Channel DPF Filtration and Sensitivity Analysis of Important Model Parameters

Seung-chai Jung¹⁾ · Jong-sun Park¹⁾ · Woong-sup Yoon^{*2)}

¹⁾Graduate School, Department of Mechanical Engineering, Yonsei University, Seoul 120-749, Korea

²⁾Department of Mechanical Engineering, Yonsei University, Seoul 120-749, Korea

(Received 6 April 2006 / Accepted 23 May 2006)

Abstract : Prediction of diesel particulate filtration is typically made by virtue of modeling of particulate matter (PM) collection. The model is closed with filtration parameters reflecting all small scale phenomena associated with PM trapping, and these parameters are to be traced back by inversely analyzing large-scale empirical data-the pressure drop histories. Included are soot cake permeability, soot cake density, soot density in the porous filter wall, and percolation constant. In the present study, a series of single channel DPF experiment is conducted, pressure histories are inversely analyzed, and the essential filtration parameters are deducted by DPF filtration model formulated with non-linear description of soot cake regression. Sensitivity analyses of model parameters are also made. Results showed that filtration transients are significantly altered by the extent of percolation constant, and the soot density in the porous filter wall is controlling the filtration qualities in deep-bed filtration regime. In addition, effect of soot particle size on filtration quality is distinct in a period of soot cake regime.

Key words : Diesel particulate filter, DPF (디젤 입자상 물질 여과 장치), Pressure drop (압력 강하), Filtration (여과), Sensitivity analysis (민감도 해석)

1. 서론

디젤 입자상 물질(Particulate Matter, PM)을 제거하기 위한 장치로 여러 방법들이 제시되었으나 실용적으로는 DPF(Diesel Particulate Filter)가 많이 사용되고 있으며 이는 DPF의 높은 여과 효율에 따른 결과이다.¹⁾ 필터에 포집된 입자상 물질은 유로를 좁혀 배기의 흐름을 방해, 유동 저항을 증가시켜서 배압을 상승시키므로 주기적으로 혹은 연속적으로 제거되지 않으면 안 된다. 이러한 주기적(혹은 비주기

적)인 제거를 재생(regeneration)이라고 한다.¹⁾ 재생시, 필터에 포집된 PM의 양이 일정한 한도 이상이 될 때 디젤엔진의 배기 내 다량 함유되어 있는 산소와 반응하면 국부적으로 급격한 온도상승(uncontrolled regeneration)을 야기하고 저속의 배기환경에서는 이 열이 적절히 제거되지 않으므로 필터에 손상을 일으키게 된다. 반대로 포집된 PM의 양이 너무 적을 때 자주 재생을 하는 것은 효율적이지 못할 뿐더러 후처리장치의 내구성에도 문제를 야기하게 된다. 따라서 적절한 재생 시기를 결정하기 위해서는 필터 내에 포집된 PM의 양을 정확히 알아야 한

*Corresponding author, E-mail: wsoon@yonsei.ac.kr

다. 그러나 필터에 포집된 PM의 양을 실시간으로 계측하기는 현실적으로 매우 어렵기 때문에, 포집된 PM의 양에 비례하여 압력강하 양이 늘어난다는 물리적 일관성에 근거하여 DPF 양단의 차압을 계측하고 이를 이용하여 포집된 PM의 양을 예측하는 방법이 대안으로 제시되고 있다. 포집된 PM의 양과 차압과의 관계는 배기가스의 온도, 속도, 성분, PM의 크기 분포 그리고 필터의 종류, 사양 등에 의해 달라진다. 이처럼 많은 변수들이 연관되어 있기 때문에 실험적인 방법만으로 차압과 포집된 PM의 양 사이의 관계를 찾는 데에는 시간적, 경제적 양적 제한이 따르게 된다. 따라서 실험적인 연구를 보조하거나, 새로운 PM제거용 필터를 개발하기 위해서, 그리고 예측에 의한 재생 제어(model-based control)의 목적으로 필터에서의 여과 상태와 압력 강하를 연관시켜 포집성능과 재생효과를 모사하기 위한 모델링 연구가 활발히 진행되어 왔다.^{2,10)}

DPF 모델링은 Bissett³⁾에 의해서 처음 시도되었다. 이 초기의 기계적 모델링에서는 채널에서의 유동장, 필터 면 위에 쌓인 PM 층(soot cake)의 높이 그리고 열에 의한 재생 과정 등이 연구 되었으며 현재에도 많은 DPF 모델들의 기초가 되고 있다. Konstandopoulos와 Johnson⁴⁾은 Bissett의 모델에서는 다루어지지 않은 필터 내부 미세공에서의 포집현상(deep-bed filtration)을 포함하였으며, 입자 크기에 따른 포집 효율과 압력 강하에 대해서 연구 하였고, DPF 모델링의 중요한 한 계통을 정립하였다. Johnson과 Opris^{5,6)}는 재생 과정을 포함하는 2차원 모델을 제안하였는데, 여기서는 기계적인 포집 메커니즘에서 중력 침강을 제외한 브라운 확산, 차단, 관성 충돌에 의한 포집 효율을 고려하는 DPF 여과 모델이 구성되었다. 또한 압력 강하의 비정상 현상을 모사하기 위해서 유효 다공성(effective porosity)의 개념을 도입하였다. Konstandopoulos 등은 그들의 이전 연구를 바탕으로 채널 입구/출구에서의 수축/팽창에 의한 압력의 관성 손실에 대해서 연구하였으며,⁷⁾ 필터면에 쌓인 PM 층(soot cake)의 다공성과 투과성은 Peclet 수의 함수로 나타낼 수 있음을 보였다.⁸⁾ Huynh 등은 DPF 채널 길이 방향으로의 여과 속도 변화를 고려하였으며 또한, 촉매가 코팅된

DPF의 재생 과정을 모사하기 위한 two-layer model을 적용하였다.⁹⁾ 그리고 Kladopoulou 등은 DPF 전체를 하나의 덩어리로 간주한 모델(lumped parameter model)을 제시하고 재생 과정에서의 온도 및 차압을 실험 결과와 비교하였다.¹⁰⁾

실제 사용이 가능하고 수치적으로 안정하며 또한, 간단하지만 정확한 모델을 구현하기 위해서, DPF에 의한 여과 및 차압에 관한 많은 연구들이 수행되어 왔다. 그러나 지금까지의 모든 모델에서는 몇 개의 중요한 준 수송상태량(pseudotransport properties)인 미지 변수(PM 층의 투과성 및 밀도, 필터 내부에 포집된 PM 층의 밀도, 여과 상수)들을 사용하여 수식을 완성하고 있는데 이들은 실험적인 방법을 통해서만 결정된다.¹⁰⁾ 이와 같은 난이성은 필터링에서의 매우 작은 스케일의 현상들을 상태량 변수를 사용하여 모사하고자 할 때 필연적으로 발생하는 문제로, 현상과 취급에서의 스케일의 차이와 다양한 물리적 복잡성으로 인하여 수식에 의하여 직접 유도될 수가 없기 때문이다. 본 연구에서는 실험 데이터로부터 이들 미지 변수들의 값을 추출하기 위한 수치 기법을 확립하고, 구해진 미지 변수들을 이용하여 DPF 여과 과정을 시뮬레이션하였다. 또한 미지 변수에 대한 모델의 민감도 해석을 통해서 모델의 예측 결과에 큰 영향을 주는 변수를 선별하고 이 변수들이 시뮬레이션 결과에 주는 영향을 분석하였다.

2. 압력 강하 모델

DPF에 의한 PM의 포집과 그에 따른 압력 강하 모델링은 많은 연구자들에 의해서 연구되었지만 그 중에서도 특히 Konstandopoulos와 Johnson^{4,11)}의 방법이 널리 사용되고 있는데, 모델에 포함된 몇 개의 미지 변수만 적절히 입력된다면 다양한 배기 조건에서 정확한 예측을 하는 것으로 알려져 있다. 이 모델에서 PM 층과 필터에 의한 압력 강하는 Darcy's law를 사용하여 계산하며 필터 내부에서의 PM 포집 양은 단위 포집기 여과 이론(unit collector filtration theory)을 사용하여 구한다. 본 연구에서는 현재의 DPF 여과모델의 일반성을 고려하여 Konstandopoulos와 Johnson^{4,11)}이 제안한 모사 방법을 근간으로

하였다. PM 층과 필터에 의한 압력 강하는 Darcy's law를 사용하여 표현한다.

$$\Delta p = \frac{\mu}{k_{wall}} u_{wall} w + \frac{\mu}{k_{soot}} \int_0^{w_s} u_{soot}(x) dx \quad (1)$$

여기서, Δp , k_{wall} , k_{soot} , u_{wall} , u_{soot} , w , w_s , μ 는 각각 압력 강하, 필터의 투과성(permeability), PM 층의 투과성, 필터에서의 여과 속도(filtration velocity), PM 층에서의 여과 속도, 필터의 두께, PM 층의 두께, 그리고 배기가스의 점성을 의미한다. 식 (1)에서 입구/출구 채널에서의 점성 저항에 의한 손실, 수축/팽창에 의한 관성 손실, 다공성 매질을 지나는 유체의 속도가 비교적 클 때 발생하는 Forchheimer 효과¹²⁾ 그리고 압축성 효과는 고려되지 않았고, 뒤에서의 실험에서도 이 효과를 제거한 순수한 필터에 의한 압력강하만을 사용하였다. 식 (1)에서는 필터 내부에서의 투과성을 단일 값으로 표현하였으나 실제로는 급격한 포집 PM의 농도변화가 존재하므로, 필터 내부에서의 PM 포집에 의한 필터의 투과성 변화를 고려하면 식 (1)은 아래와 같이 쓸 수 있다.

$$\Delta p = \mu u_{wall} dw \sum_i \frac{1}{k_{wall,i}} + \frac{\mu}{k_{soot}} \int_0^{w_s} u_{soot}(x) dx \quad (2)$$

여기서 dw 는 차분된 필터의 길이이고, $k_{wall,i}$ 는 i 번째의 차분된 필터에서의 투과성이다.^{10,11)} 만약 PM 층 내부에서의 여과 속도가 일정하다고 가정하면, 위의 식 우변의 마지막 항에서 PM 층의 밀도와 투과성은 항상 곱의 형태로 나타나므로 수력학적 저항 인자(hydrodynamic resistance factor, $k_{soot} \rho_{soot,c}$)를 정의하여 나타낼 수 있다.¹²⁾

$$\Delta p = \mu u_{wall} dw \sum_i \frac{1}{k_{wall,i}} + \frac{\mu u_{soot}}{k_{soot} \rho_{soot,c}} \frac{m_c}{A_{filt}} \quad (3)$$

여기서, m_c , $\rho_{soot,c}$, A_{filt} 는 각각 PM 층의 질량, 밀도, 그리고 여과 면적이다. A_{filt} 는 아래와 같이 근사적으로 표현될 수 있다.

$$A_{filt} \approx 4\alpha L \quad (4)$$

식 (4)에서, α 는 채널의 폭, L 은 필터의 길이이다. PM 층에서의 여과 속도와 필터에서의 여과 속도가 같다고 가정하면 ($u_w \approx u_{wall} \approx u_{soot}$) 식 (3)은 다음과 같이 압력강하를 위한 최종 식으로 표현된다.

$$\Delta p = \mu u_w dw \sum_i \frac{1}{k_{wall,i}} + \frac{\mu u_w}{k_{soot} \rho_{soot,c}} \frac{m_c}{A_{filt}} \quad (5)$$

3. 단일 채널 DPF 실험

실물 크기(full-scale)의 원통형 DPF의 경우, 단면적이 넓고 외곽 원주면은 일반 대기에 노출되어 있기 때문에 반경 방향으로 온도 및 배기가스의 속도 구배가 발생한다. 온도 구배에 의한 외부 또는 채널 간의 열전달은 DPF 내의 온도를 일정하게 유지시키기 어렵게 만들며, 각 채널에서의 배기 속도 차이에 의한 여과 속도의 변화는 각각의 채널에서의 PM 층 두께의 불균일성을 야기시킨다. 따라서 이러한 DPF 구조에 따른 불확실성에 의해서 발생하는 문제들을 제거하고 수치 모델에 사용되는 실험 데이터의 신뢰도를 높이기 위해서 원통형 DPF의 채널 하나에 해당되는 단일 채널 DPF(single channel DPF, SC-DPF)를 사용하여 PM 포집 실험을 실시하였다(Fig. 1). Table 1에 SC-DPF의 제원을 제시하였다.

자연 흡기 방식의 2957cc, IDI(Indirect Injection) 엔진에서 발생된 배기가스는 부분 유동 시스템(partial flow system, Fig. 2)의 2차관으로 유입되어서 SC-DPF를 통과 하도록 설계하였다. 2차관으로 유입되는 유량은 MFC(Mass Flow Controller)를 이용하여 조절 하였으며 전기 히터를 사용하여 배기가스의 온도를 조절할 수 있도록 하였다. 부분 유동 시

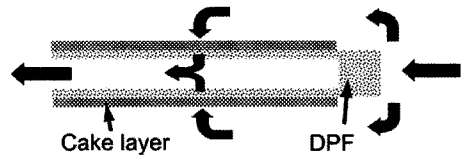


Fig. 1 Profile of running diesel exhaust flows and PM trapping through SC-DPF

Table 1 Properties of single channel DPF

Property	Corning EX-80
Total length [mm]	95
Plug length [mm]	10
Wall thickness [mm]	0.4318
Porosity [%]	48
Mean pore size [μ m]	12.5
Channel width [mm]	2.1

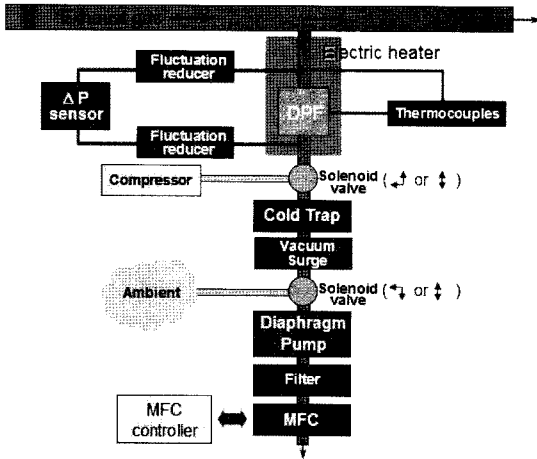


Fig. 2 Schematic of DPF test by partial flow system equipped with MFC for regulating bifurcated exhaust gas flow rate and electric heater for temperature control

시스템을 사용함으로써 DPF에서의 압력 손실을 결정하는 가장 중요한 세 가지의 유동 변수인, PM 농도, DPF를 통과 하는 배기 유량(표준 상태를 기준으로, sLPM), 그리고 배기 온도를 각각 독립적으로 제어할 수 있게 하였으며 Table 2에 사용된 실험 조건을 보이고 있다. 여과 속도는 배기 유량을 여과 면적으로 나누어서 계산하였으며, 표준 상태(20°C)와 배기가스 온도(260°C) 차이에 의한 부피 팽창 효과를 보정해야 한다. 190°C 이상의 고온에서는 SOF(Soluble Organic Fraction)는 기상으로 존재하기 때문에, 채집된 샘플에 대하여 Soxhlet 추출을 실시하여 SOF를 제거한 후 무게를 측정하여서 PM의 농도를 추정하였다. 그리고 배기가스의 분자량은 29kg/kmol로 측정되었다. 배기가스를 이용한 본 실험에 앞서, 공기를 이용하여 SC-DPF의 투과성과 필터 입/출구에서의 수축/팽창에 의한 관성 손실 계수를 측정하였으며 각각 8.3×10^{-13} , 1.55로 예측되었다.

Table 2에 제시된 네 가지 실험 조건에 따라 계측된 시간에 따른 압력 강하를 Fig. 3에 보이고 있으며, 여기서는 입구/출구 채널에서의 마찰저항에 의한 압력 손실 및 수축/팽창에 의한 관성 손실을 제거한 필터와 PM층에 의한 압력 강하만을 고려하였다. 모든 압력 손실이 포함된 실제 계측된 압력 강하 데이터로부터 필터 벽과 PM 층에 의한 압력 강하량(Fig. 3)

Table 2 Modes of single channel DPF tests

	sLPM	T [°C]	u_w [m/s]	\dot{m}_{soot} [kg/s]
Mode 1	1.08	260	0.046	0.3883×10^{-9}
Mode 2	1.61	260	0.069	0.5833×10^{-9}
Mode 3	2.15	260	0.092	0.7667×10^{-9}
Mode 4	4.30	260	0.184	1.5333×10^{-9}

* T : 배기가스 온도, u_w : 여과 속도, \dot{m}_{soot} : PM의 질유량

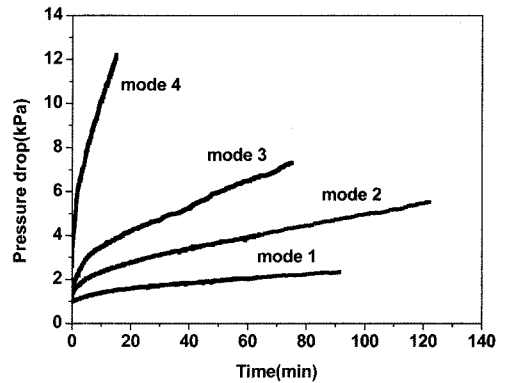


Fig. 3 Evolutions of SC-DPF pressure drop due to different operation modes (Mode 1 through 4)

만을 추출하는 기법은 참고문헌[15]의 방법을 따랐다. 실험 방법 및 장치에 관한 보다 자세한 설명은 공동 연구자의 이전 연구^[3,14]에 상세히 기술되어 있다.

4. DPF 압력 강하 모델 파라미터

4.1 모델 파라미터의 결정

DPF에 의한 PM 포집과 압력 강하 모델은 몇 개의 미지 변수들을 포함하고 있으며, 이 변수들은 실험적으로 결정되어야만 하는데, PM 층의 투과성(k_{soot}), 밀도($\rho_{soot,c}$), 필터 내부에 포집된 PM 층의 밀도($\rho_{soot,w}$) 그리고 여과상수(ψ) 등이 그것이다. 이들은 입자 레벨의 미시적(microscopic) 현상을 내포하고 있으므로 거시적인(macroscopic) 기계적 모델링 방법으로는 결정할 수 없는 변수들이다. 이 중에서 PM 층의 투과성과 밀도는 필터 벽 위에 쌓인 PM 층의 공극률을 나타내는 변수로 PM 층에서의 압력 강하에 직접적인 영향을 미친다. 이전의 연구결과^[8,17]에 의하면 이 두 변수는 Peclet 수(대류에 의한 입자 전달과 확산에 의한 전달의 비)의 함수로 나타낼 수

있음이 밝혀졌다. 필터에 의한 여과가 진행된다면 포집된 PM은 필터 내부의 포집기(collector)에 정착된다. 이 강력한 정착효과는 PM과 같이 매우 작은 크기의 입자들의 경우 그 침착도(deposition parameter)가 포집기 내부 유로에서의 높은 확산도, 긴 유로길이 그리고 작은 유량에 의하여 매우 높아지기 때문이다. 여기서 정착량의 증가에 따라 포집기도 커지는 효과가 발생하며 포집 효율 및 압력 강하량이 빠르게 변하므로 이를 모델 식에 반영하여야 한다. 포집기 크기의 증가율은 포집기에 정착된 PM 층의 밀도($\rho_{soot,w}$)에 의해서 결정된다. 따라서 $\rho_{soot,w}$ 는 초기 필터 벽에 의한 여과(deep-bed filtration) 구간에서, 필터에 의한 압력 강하와 포집 효율의 비정상 거동에 영향을 미친다. 여기서 포집기에 정착된 입자는 Peclet 수에 따라서 매우 복잡한 형상의 돌기(dendrite)를 형성하면서 성장하는 것으로 알려져 있다. 이 돌기는 주로 유동과 맞닥뜨리는 포집기 앞부분에서 성장하며 결국은 인접한 포집기에서 성장해 오던 또 다른 돌기와 만나서 유동 및 입자의 흐름을 크게 방해하게 된다. 그러나 많은 시도에도 불구하고 이러한 현상을 적절히 모사할 수 있는 모델은 아직 개발되지 않았으며 본 연구에서도 포집기의 전체 면에 일정한 밀도($\rho_{soot,w}$)를 가진 PM 층이 균일하게 형성된다고 가정하였다. 이러한 모델링의 근본적인 한계로 인해서 $\rho_{soot,w}$ 에 어떠한 물리적인 의미를 부여하기는 어렵다. 여과 초기에는 필터 최상단의 공극률이 높아서 비교적 많은 PM이 필터 내부로 들어갈 수 있다. 그러나 여과가 진행될수록 필터 윗부분의 공극이 PM으로 가득차고 포집기의 크기가 커지므로 필터 내부로 들어가는 PM의 양은 점차 줄어들게 된다. 포집기의 크기가 매우 커져서 공극이 거의 없어지게 되면 PM이 필터 내부로 들어가지 못하게 되는데, 이 상황을 “완전히 포집된 상태(completely loaded)”라고 하며 이때의 포집기의 크기는 여과상수(ψ)에 의해서 결정된다. 그러므로 여과상수는 필터에 의한 여과에서 PM층에 의한 여과(cake filtration)로의 천이에 관여하는 변수라고 할 수 있다. 이러한 변수들이 압력 강하 모델에 구체적으로 어떻게 연관되어 있는지는 여러 연구에서 밝혀져 있다.^{10,11)} 이 변수들 중 특히 $\rho_{soot,w}$ 와 ψ 는 실험

데이터를 역 해석(inverse-analysis)하는 방법으로만 구할 수 있다. 이 두 변수는 단위 포집기 모델과 Darcy's law를 사용하는 DPF 모델에 맞도록 조절되는 값이기 때문이다. 본 연구에서는 위에서 설명한 바와 같이, k_{soot} 과 $\rho_{soot,c}$ 를 분리해서 사용하는 대신 수력학적 저항 인자($k_{soot}\rho_{soot,c}$)를 사용하였다.

실험 데이터로부터 $k_{soot}\rho_{soot,c}$, $\rho_{soot,w}$ 그리고 ψ 를 추출하기 위해서 Levenberg-Marquardt 방법¹⁶⁾을 적용하였다. 이 수치 기법은 미지 변수를 포함하고 있는 비선형 함수의 값이 최소가 되도록 미지 변수를 결정하는 방법이다. 본 연구의 경우에는, 모델 식과 측정치와의 차이를 가장 작게 하는 모델 파라미터를 결정하게 된다. 그러나 이러한 반복적인(iterative) 수치 계산으로부터 얻어낸 파라미터 값이 고유하며(uniquness) 물리적으로 타당한 범위에 있는지에 대해서는 별도로 평가해야 하며, 아래 소개될 별도의 방법으로 계산한 파라미터 값과 비교 함으로써 본 연구에 사용한 미지 변수 추출 기법의 타당성을 검증하였다.

실험 데이터를 이용하여 추출한 미지 변수 값을 Table 3에 제시하였으며 이 값을 사용하여 시뮬레이션한 결과를 Fig. 4에서 측정값과 비교하였다. 실험 데이터로부터 추출한 값을 사용하여 시뮬레이션하였기 때문에 측정치와 잘 일치하는 것은 당연한 결과이다. 모든 경우에 대해서 PM의 크기는 $0.1\mu\text{m}$ 로 가정하였다. 사실, PM의 크기는 분포를 가지고 있으며 크기에 따른 포집 효율도 각각 다르다. 그러나 통계적 처리방법을 사용하지 않는 본 연구에서와 같은 결정모델에서는 PM의 크기 분포가 수식적으로 밝혀져 있지 않은 이상 크기나 수밀도의 분포를 적절히 다루기는 어려우며 대표 직경을 정의해서 사용하는 것이 효과적이다. 디젤 배기에 포함된 PM은 축적 모드(accumulation mode)인 $0.08\mu\text{m}\sim 0.2\mu\text{m}$ 사이에서 가장 농도가 높기 때문에¹⁷⁾ $0.1\mu\text{m}$ 를 대표 직경으로 선택하였다. 입자 계측 시, 핵 모드(nuclei mode)에서 매우 많은 개수의 입자가 검출되는데 이는 회석과정 중에 응축된 유황염 입자(sulfate particle)와 탄화수소 입자(hydrocarbon particle)가 많기 때문이다. 고온의 배기가스 환경에서는 이러한 입자의 대부분이 기상으로 존재하기 때문에

Table 3 Parameters estimated by non-linear regression calculation

	$\rho_{soot,w}$ [kg/m ³]	ψ	$k_{soot}\rho_{soot,c}$ [kg/m]
Mode 1	2.87612	0.88938	3.5953×10^{-12}
Mode 2	4.39683	0.89454	3.3994×10^{-12}
Mode 3	3.38055	0.89091	2.7110×10^{-12}
Mode 4	1.90555	0.88143	1.4373×10^{-12}

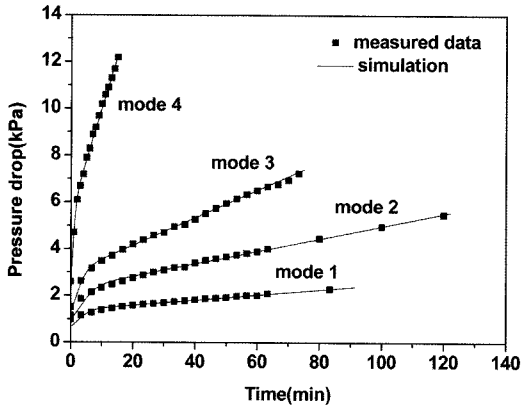


Fig. 4 Experimental filter pressure drops compared with the prediction of calibrated model(solid line)

축적 모드에서의 것을 대표 직경으로 하여야 한다.

보다 직관적이고 여과 메커니즘의 물리적 현상에 기초한 방법을 이용하여 수력학적 저항 인자 ($k_{soot}\rho_{soot,c}$)를 산출할 수도 있다. PM 층에 의한 여과를 여과의 주요 메커니즘으로 사용하는 필터의 경우, 일반적으로 PM 층 여과 구간(cake filtration)에서는 포집된 PM의 양에 비례하여 압력이 선형적으로 증가한다. 그 이유는 동일한 배기 조건에서 형성되는 PM 층의 다공성은 일정하고 따라서 Darcy's law에서의 PM 층의 투과성이 변하지 않기 때문에, PM 층의 높이 비례해서 압력 강하가 증가하기 때문이다. 이 구간에서는 필터 벽에 의한 압력 강하가 일정하므로 식 (5)를 시간에 대해 미분하면 식 (6)을 얻을 수 있고, 압력 강하 기울기($d\Delta p/dt$)를 측정치로부터 Fig. 5에서와 같이 선형 피팅(linear fitting)하여 $k_{soot}\rho_{soot,c}$ 값을 산출할 수 있다.

$$\frac{d\Delta p}{dt} = \frac{\mu u_w}{k_{soot}\rho_{soot,c}} \frac{1}{A_{filt}} \frac{dm_c}{dt} \quad (6)$$

$$\frac{dm_c}{dt} = \dot{m}_{soot} \quad (7)$$

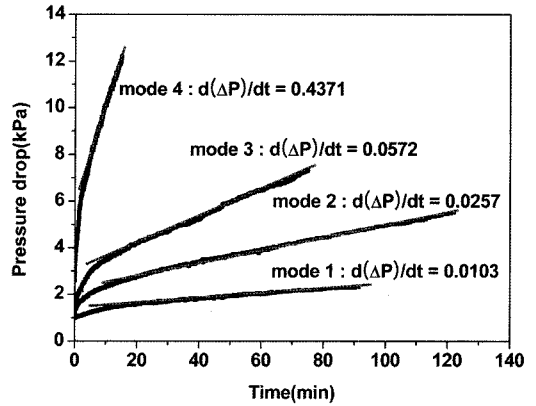


Fig. 5 Slopes of increasing pressure drop at soot cake filtration regime (slope $d\Delta p/dt$ is for the linear portion of soot cake filtration regime)

위에서 설명한 두 가지 방법으로 산출한 $k_{soot}\rho_{soot,c}$ 값을 Table 4에서 비교하였으며 실험적 오차 범위 내에서 잘 일치하는 것을 확인할 수 있다. 따라서, 본 연구에서 모델 파라미터를 추출하기 위해 사용한 비선형 추세(non-linear regression) 계산 방법이 물리적으로 타당한 값을 산출하고 있음을 알 수 있다.

Table 4 Hydrodynamic resistance factors(data non-linear regression calculation vs. fitted experimental data)

	$k_{soot}\rho_{soot,c}$ non-linear regression [kg/m ³]	$k_{soot}\rho_{soot,c}$ linear fitting [kg/m ³]	diff [%]
Mode 1	3.5953×10^{-12}	3.8830×10^{-12}	-7.4
Mode 2	3.3994×10^{-12}	3.5532×10^{-12}	-4.3
Mode 3	2.7110×10^{-12}	2.7972×10^{-12}	-3.1
Mode 4	1.4373×10^{-12}	1.4638×10^{-12}	-1.8

4.2 모델 파라미터의 민감도

DPF 여과 모델을 이용하여 포집된 PM의 양 및 필터가 처한 상황을 예측하고자 할 때에 선행 되어야 할 것은, 변수에 대한 모델의 민감도 해석을 통해서 모델의 예측 결과에 크게 영향을 주는 변수와 그렇지 않은 변수들을 분류하고 그 영향이 어느 정도인지를 미리 인지하는 것이다. 그리고 배기 조건에 따

큰 모델 파라미터(k_{soot} , $\rho_{soot,c}$, $\rho_{soot,w}$, ψ)들의 변화 경향성을 확인하고 이들을 배기 조건(PM의 농도 및 크기, 배기의 온도, 속도 등)의 함수로 나타내어야 한다. 본 논문에서는 압력 강하에 직접적으로 영향을 주는 것이 분명한 수력학적 저항인자를 제외하고 여과 상수와 필터 내부에 포집된 PM 층의 밀도에 대한 모델의 민감도를 조사하였다. 그리고 PM 크기(d_p) 변화에 대한 영향도 알아보았다.

압력 강하에 대한 여과 상수(ψ)의 영향을 Fig. 6에 나타내었다. Mode 3 조건에서의 측정치로부터 산출한 값(Table 3)을 기준으로 -2%~2%까지 변화시키면서 압력 강하를 시뮬레이션 하였다. 전체 실험 조건 (Mode 1~Mode 4)에서 포집이 끝났을 때의 오차 (Table 3의 기준 값을 사용했을 때에 대해서 임의로 변화 시킨 값을 사용했을 때의 편차)는 Table 5에 백분율로 나타내었다. 여과 상수가 작다는 것은 “완전히 포집된 상태”의 포집기 크기가 작다는 것을 의미하므로 그만큼 필터 벽에 의한 포집이 빨리 끝나게 되고 필터 공극의 부피가 상대적으로 큰 상태로 남아 있게 될을 의미하므로, 여과 상수가 작을수록 압력 강하가 작게 예측된다. 특히할 것은 여과 상수가 조금만 변하더라도 압력 강하는 매우 크게 변화된다는 것이다. 기준 값에 대해서 2%의 분율을 변화시켰을 경우 최고 21%의 오차를 보였다. 그러므로 여과 상수는 매우 민감한 모델 파라미터임을 알 수 있

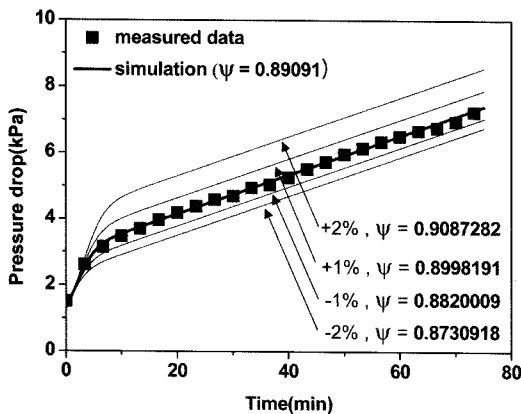


Fig. 6 Sensitivity of pressure drop to percolation constant for mode 3. Thick solid line is model prediction with base values of filtration parameters. Percolation constant is forced to be deviated in the range of $\pm 2\%$ (thin solid line) from the reference quantity (thick line)

Table 5 Sensitivity of pressure drop against percolation constant (ψ) (deviation in percentage)

	-2%	-1%	+1%	+2%
Mode 1	-11.9	-6.8	9.1	21.1
Mode 2	-9.3	-5.3	7.3	17.6
Mode 3	-8.7	-4.9	6.5	15.6
Mode 4	-9.2	-5.1	6.4	14.7

으며 그 결정에 주의를 필요로 함과 동시에 이에 관한 좀 더 적극적인 모델링이 요구된다.

Mode 3의 경우에 대해서 포집된 PM 층의 밀도 ($\rho_{soot,w}$) 변화에 대한 영향을 Fig. 7에 보이고 있으며 전체 실험 조건에 대한 포집이 끝났을 때의 압력 편차는 Table 6에 나타내었다. 이번에는 측정치로부터 산출된 값(Table 3)에 대해서 -20%~20%까지 변화시켜 보았다. 전체적으로 0.6% 이내의 오차를 보였는데, 이것으로부터 압력 강하는 필터 내에 포집된 PM 층의 밀도 변화에 크게 영향을 받지 않는다는 것을 알 수 있다. 그리고 PM 층에 의한 여과 영역 보다는 필터 벽에 의한 여과 영역에서 더욱 큰 차이를 보이고 있다. $\rho_{soot,w}$ 는 필터 내부에서의 PM 포집에 의한 단위 포집기 크기의 성장률을 결정하는 변수이기 때문에 필터에 의한 포집이 진행되는 구간에서 더욱 큰 영향을 나타내는 것은 당연한 결과라고 생각된다. $\rho_{soot,w}$ 가 작아질수록 필터에 포집된 PM

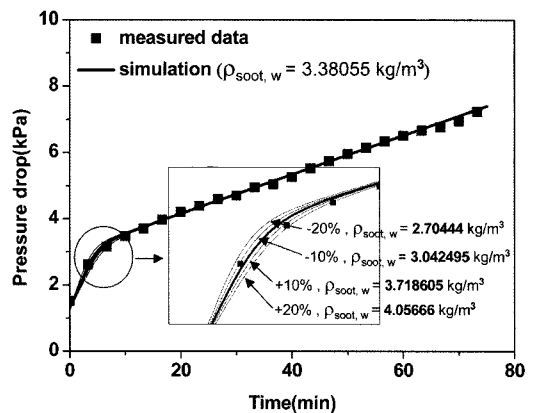


Fig. 7 Sensitivity of pressure drop to soot density in the filter wall for mode 3. Thick solid line is model prediction with base values of filtration parameters. Soot density in the filter wall is forced to be deviated in the range of $\pm 20\%$ (thin solid line) from the reference quantity (thick line)

Table 6 Sensitivity of pressure drop against soot density in the filter wall ($\rho_{soot,w}$) (deviation in percentage)

	-20%	-10%	+10%	+20%
Mode 1	0.3	0.1	-0.1	-0.3
Mode 2	0.3	0.2	-0.2	-0.3
Mode 3	0.4	0.2	-0.2	-0.4
Mode 4	0.6	0.3	-0.3	-0.6

층의 단위 질량당 부피가 증가 하므로 포집기는 빨리 성장 하게 되고 따라서 PM 층에 의한 여과 메커니즘으로 천이가 더욱 촉진된다. 하지만 PM 층에 의한 여과 구간에서는 일정한 값으로 수렴하는 특성을 보인다.

마지막으로 PM의 크기 (d_p)에 대한 압력 강하 민감도를 조사하였다. 일반적인 디젤 PM의 크기 범위에서 포집기 표면으로의 입자 접촉에는 입자의 브라운 운동에 의한 확산(Brownian diffusion)과 차단(interception)에 의한 메커니즘이 주로 작용하는데, 필터내부 유동은 매우 느리고 입자의 크기가 작으므로 기상의 대류에 의한 포착보다는 브라운 운동에 의한 확산이 주목된다. 여기서 PM의 크기는 브라운 확산에 의한 PM의 확산량을 결정하는 변수이고 따라서 필터 내부에서 단위 포집기에 의한 확산 포집 효율(diffusional collection efficiency)에 영향을 주게 된다. Mode 3에 대해서, PM의 크기로 가정한 $0.1\mu\text{m}$ 에서 -20%~20%까지 변화시켰을 때의 압력 강하 변화량을 Fig. 8에, 전체 실험 조건에서 포집이 끝났을 때의 압력 손실 오차는 Table 7에 나타내었다. 전체적으로 매우 큰 영향을 주지는 않지만(2% 이내) 여과가 진행됨에 따라서 PM 층에 의한 여과 구간에서의 차이가 더욱 벌어지는 것을 볼 수 있다. 입자의 크기가 작아질수록 압력 강하량이 작게 예측되는 이유는 필터의 포집 효율과 관계가 있다. 입자의 크기가 작아질수록 차단에 의한 포집 효율은 감소하지만 브라운 운동은 더욱 활발해져서 전체적인 포집 효율은 증가하게 된다. 따라서 PM의 직경이 작아질수록, 필터 윗부분의 포집기에 집중적으로 포집되고 필터에 의한 포집 구간도 상대적으로 일찍 끝나게 된다. 그러므로 필터에 의한 압력 강하량이 충분히 증가하지 못한 상태에서 PM 층에 의한 여과 메커니즘으로 넘어가게 되어서 상대적으로 차

Table 7 Sensitivity of pressure drop against soot particle size (d_p) (deviation in percentage)

	-20%	-10%	+10%	+20%
Mode 1	-2.0	-1.0	1.0	1.9
Mode 2	-1.6	-0.8	0.7	1.4
Mode 3	-1.7	-0.8	0.8	1.4
Mode 4	-1.9	-0.9	0.7	1.3

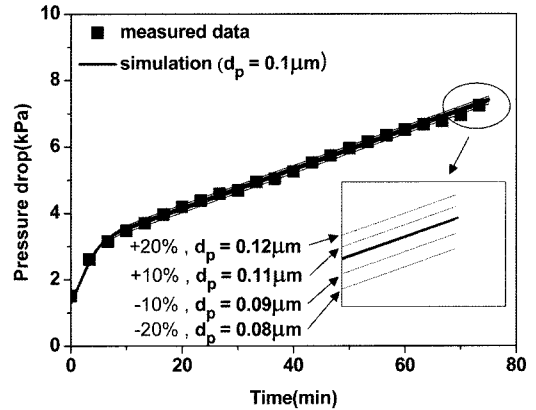


Fig. 8 Sensitivity of pressure drop to particle diameter for mode 3. Thick solid line is model prediction with base values of filtration parameters. Particle diameter is forced to be deviated in the range of $\pm 20\%$ (thin solid line) from the reference quantity (thick line)

압을 작게 예측하게 된다.

5. 결론

PM 여과 및 압력 강하 모델의 완결을 목적으로 반드시 결정되어야 하는 중요한 포집 파라미터들을 실험 데이터로부터 추출하기 위한 역 해석(inverse analysis) 계산 기법을 개발하였다. 추출된 값을 이용하여 DPF 여과 과정을 시뮬레이션 하였으며 모델 파라미터들의 압력 강하 민감도를 조사하였다.

- 1) 여과 상수를 기준값에 대해서 2% 변화시켰을 경우, 포집이 끝났을 때의 압력 손실은 최고 21%의 오차를 보였다. 그러므로 여과 상수의 크기는 압력 강하의 결정에 매우 큰 영향을 주며 역해석 파라미터로서의 사용에 주의가 요구된다.
- 2) 필터 내부에 포집된 PM 층의 밀도를 기준값에 대해서 20% 변화시키더라도 포집이 끝났을 때의 압력 손실은 단지 0.6%의 오차만 보였다. 따

라서 압력 강하는 필터 내부에 포집된 PM 층의 밀도 변화에 대해서는 민감하지 않다. 그리고 필터 내부 PM 층의 밀도 변화는 PM 층에 의한 여과 구간 보다는 필터에 의한 여과 구간에서 더 중요하게 작용한다.

- 3) PM의 크기를 기준값에 대해서 20% 변화시키더라도 포집이 끝났을 때의 압력 손실은 2% 이내이다. 그러므로 PM의 크기 변화도 전체적인 차압에 큰 영향을 주지 않으며, 필터에 의한 여과 구간 보다는 PM 층에 의한 여과 구간에서 상대적으로 그 영향이 증가한다.

후 기

이 연구는 “미래형 자동차 배기가스 제로화 기술 개발” 과제의 일부로 수행되었으며, 지원에 감사 드립니다.

References

- 1) A. E. Awara, C. N. Opris and J. H. Johnson, “A Theoretical and Experimental Study of the Regeneration Process in a Silicon Carbide Particulate Trap Using a Copper Fuel Additive,” SAE 970188, 1997.
- 2) P. Florchinger, M. Anderson, Z. T. Taubert, E. Steinbrueck and T. Angelo, “Prediction and Validation of Pressure Drop for Catalyzed Diesel Particulate Filters,” SAE 2003-01-0843, 2003.
- 3) E. J. Bissett, “Mathematical Model of the Thermal Regeneration of a Wall-flow Monolith Diesel Particulate Filter,” Chemical Engineering Science, Vol.39, pp.1233-1244, 1984.
- 4) A. G. Konstandopoulos and J. H. Johnson, “Wall-flow Diesel Particulate Filters-Their Pressure Drop and Collection Efficiency,” SAE 890405, 1989.
- 5) C. N. Opris and J. H. Johnson, “A 2-D Computational Model Describing the Flow and Filtration Characteristics of a Ceramic Diesel Particulate Trap,” SAE 980545, 1998.
- 6) C. N. Opris and J. H. Johnson, “A 2-D Computational Model Describing the Heat Transfer, Reaction Kinetics and Regeneration Characteristics of a Ceramic Diesel Particulate Trap,” SAE 980546, 1998.
- 7) A. G. Konstandopoulos, E. Skaperdas and M. Masoudi, “Inertial Contributions to the Pressure Drop of Diesel Particulate Filters,” SAE 2001-01-0909, 2001.
- 8) A. G. Konstandopoulos, E. Skaperdas and M. Masoudi, “Microstructural Properties of Soot Deposits in Diesel Particulate Traps,” SAE 2002-01-1015, 2002.
- 9) C. T. Huynh, J. H. Johnson, S. L. Yang, S. T. Bagley and J. R. Warner, “A One-dimensional Computational Model for Studying the Filtration and Regeneration Characteristics of a Catalyzed Wall-flow Diesel Particulate Filter,” SAE 2003-01-0841, 2003.
- 10) E. A. Kladopoulou, S. L. Yang, J. H. Johnson, G. G. Parker and A. G. Konstandopoulos, “A Study Describing the Performance of Diesel Particulate Filters during Loading and Regeneration-A Lumped Parameter Model for Control Application,” SAE 2003-01-0842, 2003.
- 11) A. G. Konstandopoulos, M. Kostoglou, E. Skaperdas, E. Papaioannou, D. Zarvalis and E. A. Kladopoulou, “Fundamental Studies of Diesel Particulate Filter : Transient Loading, Regeneration and aging,” SAE 2000-01-1016, 2000.
- 12) A. G. Konstandopoulos, M. Kostoglou, N. Vlachos and E. Kladopoulos, “Progress in Diesel Particulate Filter Dimulation,” SAE 2005-01-0946, 2005.
- 13) J.-S. Park, C.-S. Yoon, H.-S. Lee and K.-M. Chun, “A Study on the Relation between PM Loading and Pressure Drop using Single Channel DPF,” Spring Conference of Proceedings, KSAE, 2005.
- 14) J.-S. Park, “A Study on the Relation between PM Loading and Pressure Drop Using Single Channel DPF,” M. S. Thesis, Yonsei University, 2005.
- 15) A. G. Konstandopoulos, “Flow Resistance Descriptors for Diesel Particulate Filters: Definitions, Measurements and Testing,” SAE 2003-

- 01-0846, 2003.
- 16) W. H. Press, S. A. Teukolsky, W. T. Vetterling and B. P. Flannery, Numerical Recipes. The art of Scientific Computing, 2nd edition, Cambridge University Press, Cambridge, 1992.
- 17) S. C. Jung, J. S. Park, W. S. Yoon, "A Detailed Examination on the Important Inverse-analysis Parameters for PM Trapping in Single Channel DPF," Int. J. Automotive Technology, Submitted.