

# 수소 브레이크어웨이 디바이스 유동해석을 위한 필터의 구간별 다공성 등가 모델 제시

손성재\*, 안수진\*\*, 송태훈\*\*, 조총희\*\*\*, 박상후\*\*\*\*,#  
\*부산대학교 기계공학부 대학원, \*\* (주)화영, \*\*\*한국가스안전공사,  
\*\*\*\*부산대학교 기계공학부, 정밀정형 및 금형가공연구소

## Velocity Considered Sectional Porosity Equivalent Model (VSPE) of Filters for CFD Analysis of Breakaway Devices

Seong-Jae Son\*, Su-Jin An\*\*, Tae-Hoon Song\*\*, Choong-Hee Joe\*\*\* and Sang-Hu Park\*\*\*\*,#  
\*Graduate school of Mechanical Engineering, Pusan National University,  
\*\*Hwayoung CO., LTD., \*\*\*Korea Gas Safety CO.,  
\*\*\*\*School of Mechanical Engineering, ERC/NSDM, Pusan National University  
(Received 7 May 2019; received in revised form 2 June 2019; accepted 19 June 2019)

### ABSTRACT

We propose an equivalent model of a sintered metal mesh filter calculated by Ergun's equation and polynomial regression for the CFD analysis of breakaway devices at a hydrogen fueling station. CFD analysis of filters that cause high pressure loss is essential because breakaway devices in high-pressure hydrogen conditions require low pressure loss. A differential pressure experiment with a filter was performed in a low-pressure air condition considering similarities. An equivalent model was developed by deriving the resistance value by the polynomial regression using the experimental results. The results of CFD analysis using the equivalent model show that there was almost no error in the operating condition of the breakaway device compared to the experimental results. Through this work, we believe that the proposed equivalent model of a filter can be applied to the analysis of breakaway devices in hydrogen fueling stations. We will study how to optimize the shape and position of the filter in breakaway devices using the developed equivalent model.

**Key Words** : Polynomial Regression(다항회귀), Inertial/Viscous Resistance(관성/점성저항), Equivalent Model(등가모델), CFD(전산유체역학), Sintered Metal Mesh Filter(소결메쉬 필터)

- 기호설명 -

$\rho$  : 유체의 밀도 [ $\text{kg/m}^3$ ]      $v$  : 유체의 속도 [ $\text{m/s}$ ]

$D$  : 관의 내경 [ $\text{m}$ ]      $\mu$  : 유체의 점성 [ $\text{kg/m}\cdot\text{s}$ ]

$Re$  : 레이놀즈 수      $l$  : 유동 거리 [ $\text{m}$ ]

$R_i$  : 관성 저항 [ $1/\text{m}$ ]      $R_v$  : 점성 저항 [ $1/\text{m}^2$ ]

$e$  : 기공률 (%)      $\phi$  : 다공성 매질의 구형도

$d$  : 다공성 매질의 입자 직경 [ $\text{m}$ ]

# Corresponding Author : sanghu@pusan.ac.kr

Tel: +82-51-510-1011, Fax: +82-51-510-1973

## 1. 서 론

화석연료 자동차의 배기가스에 의한 대기환경 오염의 문제로 인해 수소연료에 대한 관심이 높아지고 있다<sup>[1]</sup>. 자동차 산업에서 수소연료전지차에 대한 연구가 주목받고 있으며, 수소연료전지차의 보급 확대를 위해서는 수소가스 스테이션 설치 등 인프라 구축이 필수적이다<sup>[1,2]</sup>. 산업통상자원부와 환경부의 발표에 따르면 2020년까지 수소차 9천 대, 2030년까지 63만 대를 보급할 계획이며, 수소차 보급을 위한 수소 스테이션 (hydrogen fueling station)은 2020년까지 80개소, 2030년까지 520개소 설치를 계획하고 있다<sup>[3]</sup>. 수소 스테이션에서는 700 bar의 높은 압력의 수소를 취급하기 때문에 시설의 견고함과 안전관리 기술들이 요구되며, 특히 Fig. 1에 나타낸 것과 같이 충전 중 차량의 발진상황 발생 시 기반시설 파손을 방지할 수 있는 브레이크어웨이 디바이스 (breakaway device) 설치가 필수적이다. 브레이크어웨이 디바이스의 역할은 수소 스테이션의 디스펜서 (dispenser)와 차량을 연결하는 충전호스 사이에 설치되어 충전 중 차량의 움직임 등의 외력이 가해지면 스테이션과 분리 및 수소 누출 차단이 가능한 기계적 장치이다. 브레이크어웨이 디바이스는 독일 등 몇 나라의 외산제품이 독점하고 있으며, 국산제품 개발이 수소차 확대를 위해 필요하다.

수소연료전지차의 연비와 충전량을 높이기 위해

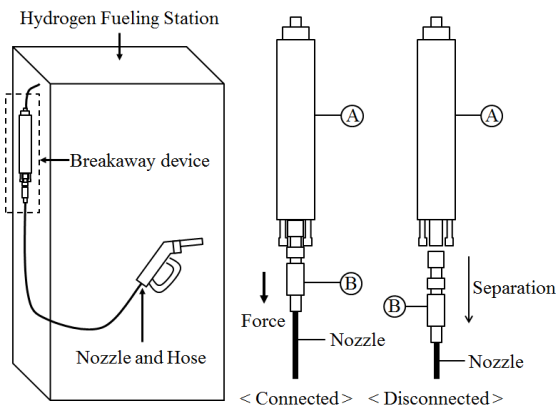


Fig. 1 Schematic configuration of breakaway device in hydrogen fueling station: ①Socket, ②Plug

서는 고압의 수소가 요구되며, 안전하게 고압의 순수한 수소연료가 차량에 주입되도록 하는 장치구성이 필요하다. 브레이크어웨이 디바이스는 충전기, 분배기, 저장탱크 등의 수송과정에서 생길 수 있는 이물질을 걸러주는 필터가 존재하며, 필터에 의한 압력손실이 발생하여 수소연료 주입성능을 저하시킨다.

이러한 문제를 해결하기 위해서 현재까지 CFD (computational fluid dynamics) 해석으로 필터 및 다공성 모델의 유동특성 예측에 대한 다양한 연구가 진행되었다<sup>[4-14]</sup>. Tung 등은 직물필터의 패턴에 따른 유동저항을 CFD 해석으로 예측하였다<sup>[4]</sup>. Hanspal 등은 산업에 사용되는 필터의 Stokes/Darcy 유동특성을 예측하였다<sup>[6]</sup>. Tronville 등은 CFD 해석과 실험적으로 주름진 필터에 대해 저항을 최소화시켜 유체 역학적 특성을 향상시켰다<sup>[10]</sup>. Benjamin 등은 3차원 모델에서 다공성 매질 (porous media) 기능을 사용한 CFD 해석을 통해 입자의 흐름 예측 모델 개발로 디젤 배기에 대한 예측이 가능하게 하였다<sup>[12]</sup>. Wu 등은 페블베드 원자로에 대해 CFD 해석과 실험적 접근으로 열-유압 특성을 예측하는 연구를 진행하였다<sup>[14]</sup>.

본 논문에서는 기존에 연구되지 않은 소결메쉬 필터 (sintered mesh filter)의 유동 특성 분석을 위하여 해석적 등가모델을 개발하고자 한다. 메쉬의 경우 100  $\mu\text{m}$  크기의 다공성 구조로 구성되어 실제 형상을 모델링할 수가 없기에 단일 매질로 가정하여 유속에 따른 구간별 유동 저항값을 고려하는 방법으로 등가모델을 개발하였다. 제시한 이론식과 다항회귀 (polynomial Regression)을 적용한 해석결과와 차압 실험결과를 비교 분석하여 신뢰성을 검증하였다.

## 2. 소결메쉬 필터 차압 실험

### 2.1 실험조건 및 구성도

수소 브레이크어웨이 디바이스의 작동조건인 70 MPa 고압 수소조건에서의 실험적 어려움이 있어 상사성을 고려한 0.7 MPa 저압 공기조건에서 실험을 진행하였다. 관내유동 및 벽면 마찰조건에

서 레이놀즈 수 (Reynolds number)로 상사성을 고려하였으며, 식(1)과 같이 나타낼 수 있다. 고압 수소 스테이션에서의 유동 조건은 출구 압력 70 MPa, 질량유량 155 LPM (liter per minute)일 때, 실험에 사용되는 저압 공기 조건은 출구 압력 0.7 MPa, 질량유량 272 LPM으로 계산되었다. 식(1)의 고압수소 조건의 레이놀즈 수( $Re_{Hydrogen, HighP}$ )와 실험 조건인 저압공기 조건의 레이놀즈 수 ( $Re_{Air, LowP}$ )를 계산할 수 있다.

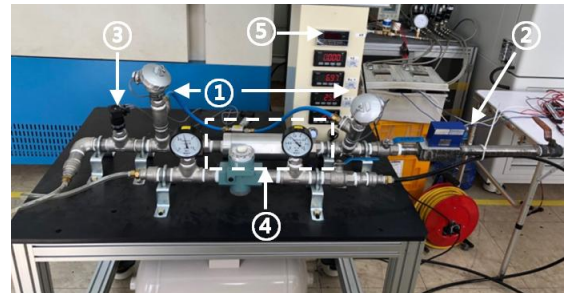
소결메쉬 필터 통과 후 발생한 압력강하를 측정하기 위한 실험장치는 Fig. 2와 같이 구성하였다. 차압실험 장비는 입구 압력 측정을 위한 압력 센서 (PSCH0020BAIG, SENSYS CO., Korea), 입구 압력과 출구 압력의 차를 측정하기 위한 차압센서 (SL20, NURI-TECH CO., LTD, Korea), 유량 측정을 위한 유량계 (D-5110.62x0, BRONKHORST, Netherlands) 그리고 필터 부를 고정하기 위한 하우징 (housing) 및 지그, 5겹으로 된 소결메쉬 필터 (plate filter, TELIN Inc., Korea) 그리고 출력값을 나타내는 계기판 (A1-1000, SENSYS CO., Korea)으로 구성하였다. 상사성을 고려한 저압 공기조건으로 실험을 진행하였으며, 필터 통과 후 발생한 압력변화를 차압계로 측정하였다. 필터의 저항값을 도출하기 위해 유량을 50 LPM에서 1000 LPM으로 조건을 변경해가면서 실험을 진행하였다. 또한 각 조건에 대해서 3번 이상 반복하여 실험하였으며 유량조건 변경시 정상상태가 된 후 차압을 측정하였다. 실험조건은 Table 1에 정리하였다.

$$Re = \frac{\rho v D}{\mu},$$

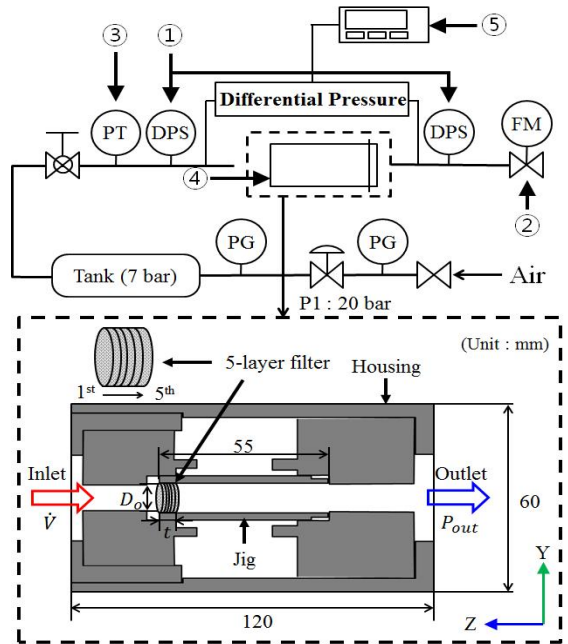
$$Re_{Air, Low P} = Re_{Hydrogen, High P} \quad (1)$$

**Table 1 Experimental conditions**

Experimental conditions	Value [unit]
Flow Rate ( $\dot{V}$ )	50 to 1000 [LPM]
Outlet pressure ( $P_{out}$ )	0.7 [MPa]
Flow fluid	air at 25 [°C]



(a)



(b)

**Fig. 2 (a) Photograph and (b) schematic diagram of experimental equipments for pressure drop test: ①pressure transmitter(PT), ②differential pressure sensor(DPS), ③flow meter(FM), ④ housing, ⑤indicator**

**Table 2 Specifications of filter**

Specifications of filter	Value [unit]
Outer Diameter ( $D_0$ )	10 [mm]
Thickness ( $t$ )	1.7 [mm]
Filter grade	40 [ $\mu$ m]
Material	SUS316L

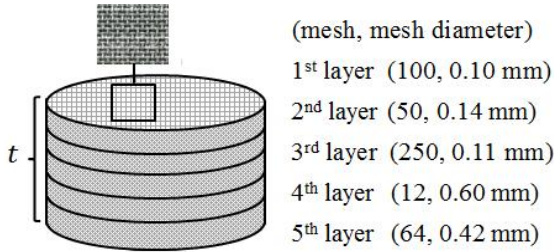


Fig. 3 Schematic diagram and photograph of five-layer sintered metal mesh filter

5점으로 된 소결메쉬 필터에 대한 정보는 Table 2와 Fig. 3에 정리하였다. 소결메쉬 필터의 각 층에 대해서 메쉬의 직경과 메쉬 수를 나타내었으며, 첫 번째 층의 경우 100 mesh는 1 inch에 직경 100  $\mu\text{m}$ 인 100개의 다공성으로 구성되어 있음을 의미한다.

### 2.2 실험 결과

소결메쉬 필터의 유무와 유량에 따른 압력강하 실험결과를 Fig. 4에 나타내었다. 각 실험 데이터는 3회 이상 시험한 결과의 평균값을 나타내었다. 필터가 없는 경우에는 유량을 1000 LPM까지 올려도 출구 압력의 100분의 1 이하의 압력손실이 발생하지만 필터가 있는 경우는 250 LPM에서 차압계가 측정할 수 있는 최대 압력인 0.11 MPa에 가까운 차압이 발생한다. 따라서 필터에 의해 큰 압력손실이 발생하며 필터의 저항값을 고려한 해석이 필수적임을 확인할 수 있었다.

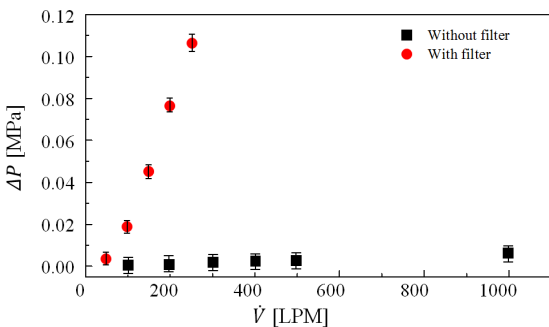


Fig. 4 Comparison of experimental results with and without filter

## 3. 유동해석

### 3.1 유동해석 방법

소결메쉬 필터 등가모델의 유동해석을 위해서 Fluent (ver.19.0, ANSYS, U.S.A)를 이용하였다. 메쉬의 공극률 및 저항값을 고려한 해석을 위해 Fluent의 다공성 매질 기능을 사용하였으며, 이론식으로 계산한 등가모델과 실험결과의 다항회귀로 도출한 작동속도별 등가모델을 비교하여 등가모델의 신뢰성을 확보하고자 하였다.

#### 3.1.1 유동해석 모델 및 경계조건

본 연구에서 사용한 모델은 Realized  $k-\epsilon$  난류 모델로 입출구 조건, 작동유체에 대해서 Table 3에 정리하였다. 계산 수렴성과 신뢰성을 고려하여 경계조건은 입구유량과 출구압력으로 설정하여 해석을 수행하였다. 유동해석은 실험 구성과 동일한 구조의 모델에 대해서 입구에는 유량조건을 50 LPM부터 250 LPM까지 50씩 증가시키면서 출구에는 압력조건을 0.7 MPa으로 해석을 수행하였다. 해석 모델은 앞에서 보인 Fig. 2(b)의 구조에 흐르는 유동에 대한 3차원 모델이며 Fig. 5와 같다. 필터의 위치에는 다공성 매질 기능으로 식(2)와 식(3)으로 표현되는 Ergun식과 다항회귀로 도출한 필터의 등가모델을 적용하여 유동해석을 수행하였다<sup>[15]</sup>. 이 때, 다공성 매질의 구형도는 무차원수로 구형에 유사한 정도를 수치화한 값이다.

$$\frac{\Delta P_v}{l} = \frac{150 \times \mu \times (1-e)^2}{\phi^2 \times d^2 \times e^2} \times v = \mu \times R_v \times v \quad (2)$$

$$\frac{\Delta P_i}{l} = \frac{1.75 \times \rho \times (1-e)}{\phi \times d \times e^2} \times v^2 = \frac{1}{2} \times R_i \times \rho \times v^2 \quad (3)$$

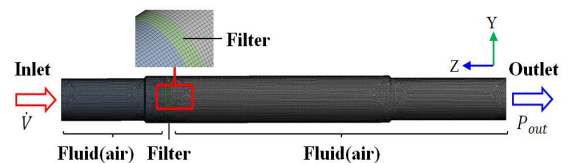
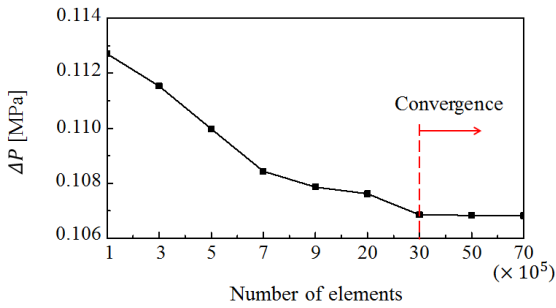


Fig. 5 Schematic diagram of CFD analysis model

**Table 3** Boundary conditions of CFD analysis

Parameters	Value [unit]
Flow Rate ( $\dot{V}$ )	50 to 250 [LPM]
Outlet pressure ( $P_{out}$ )	0.7 [MPa]
Density (Air)	1.225 [kg/m <sup>3</sup> ]
Viscosity (Air)	$1.789 \times 10^{-5}$ [kg/m·s]



**Fig. 6** Grid dependency check

### 3.1.2 격자 수렴성 확인

유동해석에 사용된 격자는 관내유동 및 벽면 마찰조건을 고려하여 벽면의 격자는 전체 두께가 1 mm 이하로 10개의 층을 갖는 육면체 격자 (hexa), 내부 유동 영역의 격자는 사면체 격자 (tetra)로 생성하였다. 격자 수렴성에 따른 해석의 신뢰성 확보를 위해 격자 수에 대한 수렴성을 확인하였다. Fig. 6 에는 격자 수에 따른 압력손실 차이 나타내었으며 약 3,000,000개의 격자 부근에서 수렴함을 확인할 수 있었다.

### 3.1.3 저항값 도출

다공성 등가모델 설계를 위해서 관성저항 (inertial resistance,  $R_i$ ), 점성저항 (viscous resistance,  $R_v$ ) 도출이 필요하다. 이론식의 경우 5개 층별 저항값을 계산하여 각 층마다 등가모델로 제시해야 하지만 다항회귀의 경우 실험결과를 이용하여 5개 층을 1 개의 단일체로 가정한 등가모델로 효과적으로 표현할 수 있다.

소결메쉬 필터의 각 층별 기공률과 필터의 메쉬 크기와 개수로 계산한 다공성 매질의 입자 직경, 입자 구형도를 고려하여 저항값을 앞서 기술한 식

**Table 4** Resistance from result of Ergun's equation

	$R_i$ [1/m]	$R_v$ [1/m <sup>2</sup> ]
1 <sup>st</sup> layer	10.23	$1.56 \times 10^6$
2 <sup>nd</sup> layer	3.24	$2.26 \times 10^5$
3 <sup>rd</sup> layer	10.87	$1.61 \times 10^6$
4 <sup>th</sup> layer	3.07	$4.68 \times 10^4$
5 <sup>th</sup> layer	1.19	$1.62 \times 10^4$

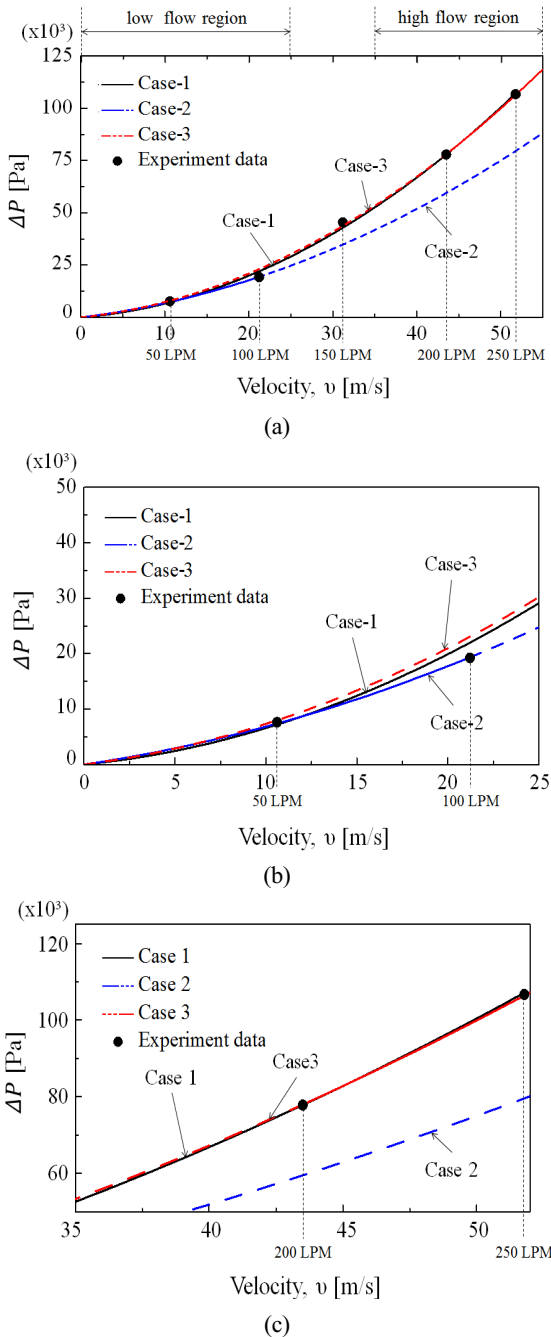
(2)와 식(3)으로 계산하였으며, Table 4에 그 결과를 정리하였다. Ergun식으로 도출한 대부분의 저항값은 일반적인  $R_v$  값 ( $10^6 \sim 10^{10}$  1/m<sup>2</sup>) 수준으로 계산되었다. 계산된 4, 5번째 층은 지지역할을 하는 층으로 필터링 역할을 하는 층에 비해 상대적으로 낮은 값으로 계산되었다.

실험결과를 이용하여 저항값을 도출하기 위해서는 이차함수로 표현되는 필터 통과로 인해 발생한 차압과 유체가 흐르는 속도의 관계식을 도출해야 한다. 이차함수 도출을 위한 다항회귀는 OriginPro 8 SR0 (v8.0724, U.S.A)를 이용하여 진행하였으며, 5개의 차압실험 결과값을 모두 고려한 이차함수를 도출하였다. 다항회귀에 대한 적합성을 판정하기 위해 카이제곱 ( $\chi$ -square test)을 사용하였다. 2개의 결과값을 고려한 이차함수에 대해서 데이터 점에서의 함수값 ( $e_i$ )과 각 실험결과값 ( $x_i$ )으로 카이제곱 ( $\chi^2$ )을 계산하며 이는 식(4)와 같이 나타낼 수 있다. 카이제곱이 일정 값 이하로 수렴하였을 때, 5개의 결과값을 고려하여 보정된 이차함수를 도출할 수 있다. 이차함수식은 일차항의 계수 ( $\alpha$ ), 이차항의 계수 ( $\beta$ )일 때, 식(5)와 같이 나타낼 수 있다. 이 때 도출한 이차함수의 계수와 저항값과의 관계는 식(6)

$$\chi^2 = \sum_i \frac{(x_i - e_i)^2}{e_i} \quad (4)$$

$$\begin{aligned} \frac{\Delta P}{l} &= \alpha \times v + \beta \times v^2 \\ &= \mu \times R_v \times v + \frac{1}{2}(\rho \times R_i) \times v^2 \end{aligned} \quad (5)$$

$$R_v = \frac{\alpha}{\mu}, \quad R_i = \frac{2 \times \beta}{\rho} \quad (6)$$



**Fig. 7** Graphs of polynomial regression in based on experimental results in (a) all region, (b) low flow-velocity region, (c) high flow-velocity region

**Table 5** Resistance from result of experiment using polynomial regression

Cases	$R_i$ [1/m]	$R_v$ [1/m <sup>2</sup> ]
case-1 (5 points data)	8.29	$1.71 \times 10^7$
case-2 (2 points data)	4.88	$2.72 \times 10^7$
case-3 (2 points data)	7.32	$2.77 \times 10^7$

과 같다. 이 과정에서 50, 100, 150, 200, 250 LPM 5개의 실험 결과값 (experiment data)을 모두 고려하여 도출한 함수값이 100 LPM에서 오차가 많이 발생하였다. 따라서 오차를 줄이기 위해 세 영역으로 구분하여 다항회귀를 진행하였다.

첫 번째 경우 (case-1)는 5개의 실험값을 모두 고려하였으며, 두 번째 경우 (case-2)는 유량이 50, 100 LPM인 저속 유동영역 (low flow-velocity region)의 실험값을 고려하였으며, 세 번째 경우 (case-3)는 유량이 200, 250 LPM인 고속 유동영역 (high flow-velocity region)의 실험값을 고려하여 다항회귀를 진행하였다. Fig. 7과 같이 세 경우의 이차함수를 비교하였을 때, 넓은 분포의 유량을 모두 고려하면 각 영역에서 오차가 크게 발생함을 확인할 수 있었다.

세 경우에 대해서 계산한 저항값을 Table 5에 나타내었다. 도출한 저항값은 Ergun식에서 도출한 저항값과 동일하게 일반적인 점성저항값,  $R_v$ 의 영역인  $10^6 \sim 10^{10}$  1/m<sup>2</sup> 수준으로 계산되었으며 5개의 층에 대한 저항값을 1개의 층으로 도출하여 이론식에 비해 비교적 높은 값을 갖는다.

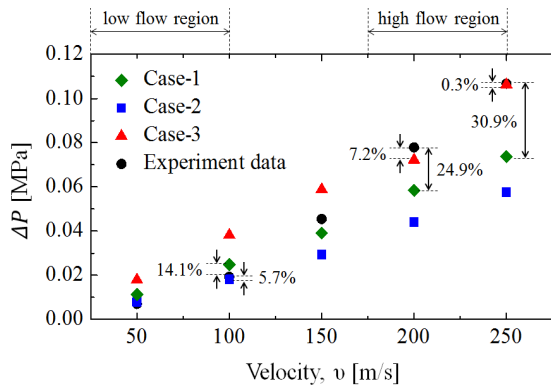
### 3.2 유동해석 결과

#### 3.2.1 영역별 다항회귀 등가모델 비교

다항회귀로 도출한 세 경우의 저항값을 적용한 등가모델 해석결과 발생한 압력강하를 실험결과와 비교하여 Table 6과 Fig. 7과 8에 나타내었다. 저속 유동영역인 100 LPM에서는 case-2 등가모델과 비교하여 case-1 등가모델은 8% 더 큰 오차가 발생한다. 또한 고속유동영역인 250 LPM에서는 case-1 등가모델은 30% 이상의 오차가 발생한다.

**Table 6 Comparison of experimental results and CFD analysis by equivalent model (3 cases)**

$\dot{V}$ [LPM]	$\Delta P_{Exp.}$ [MPa]	$\Delta P_{Case-1}$ [MPa]	$\Delta P_{Case-2}$ [MPa]	$\Delta P_{Case-3}$ [MPa]
50	0.0070	0.0113	0.0079	0.0179
100	0.0192	0.0248	0.0181	0.0382
150	0.0454	0.0391	0.0294	0.0588
200	0.0778	0.0585	0.0440	0.0722
250	0.1067	0.0737	0.0576	0.1063

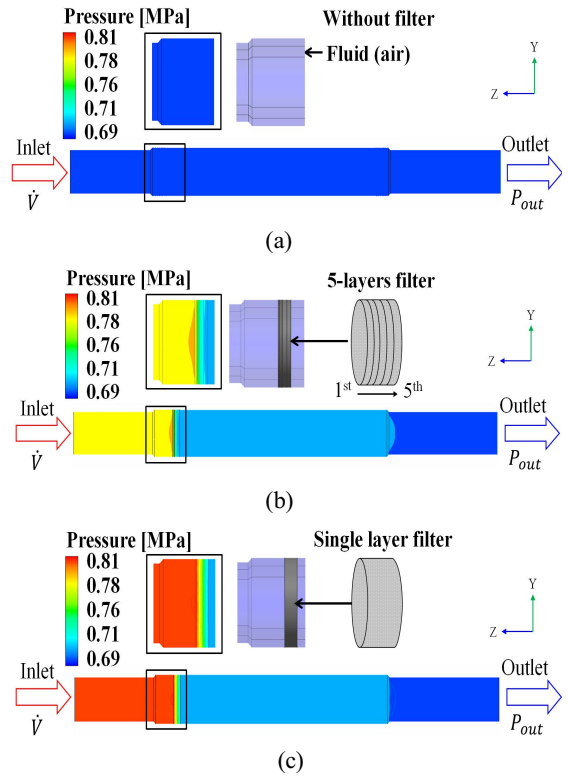


**Fig. 8 Pressure drop depending on flow rate from the result of experiments and CFD analysis using equivalent model (3 cases)**

따라서 다항회귀를 통한 증가모델 설계 시 유동영역을 구분하여 저항값을 도출해야한다. 상사성을 고려하면 고압 수소 조건이 고속유동영역에 포함되어 본 연구에서는 150 LPM 영역에서의 추가적인 저항값은 도출하지 않았다.

### 3.2.2 해석 결과 비교

입구 유량 250 LPM, 출구 압력 0.7 MPa 조건에서의 유동해석 결과, Fig. 9(a)와 같이 필터가 없는 경우에 압력손실이 0.007 MPa 수준으로 형상과 벽면 마찰에 의해서만 압력 손실이 발생하였다. 소결메쉬 필터의 저항값을 고려한 유동해석을 위해 Ergun식으로 도출한 저항값과 다항회귀로 도출한 저항값에 대해서 방향성 고려한 다공성 매질 기능으로 유동해석을 진행하였다.



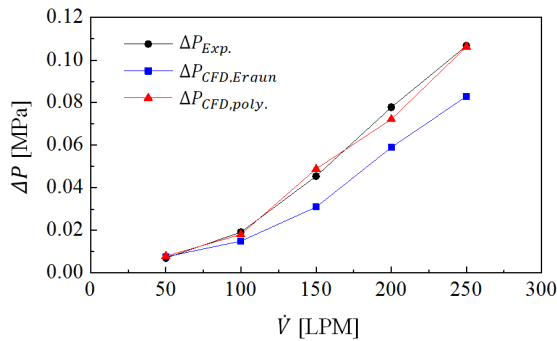
**Fig. 9 Contours of Static Pressure (a) without filter using equivalent model calculated by (b) Ergun's equation (c) polynomial regression**

Ergun식으로 도출한 저항값은 5개의 층으로 구성된 증가모델에 각 층의 저항값을 적용하여 해석을 진행한 결과, Fig. 9(b)와 같이 각 층에서 압력강하가 발생하였다. Ergun식으로 도출한 필터 증가모델 통과 후 발생한 압력강하는 0.086 MPa 수준으로 동일 조건의 실험값인 0.107 MPa 보다 작은 압력강하가 발생하여 오차가 있음을 확인할 수 있었다.

다항회귀로 도출한 저항값은 필터 영역에 layer를 구분하지 않고 하나의 증가모델에 저항값을 적용하여 진행하였지만 Fig. 9(c)와 같이 Ergun식을 적용한 경우와 유사하게 여러 개의 층이 형성되며 압력강하가 발생함을 확인할 수 있다. 또한 필터 증가모델 통과 후 발생한 압력강하는 0.106 MPa 수준으로 동일 조건의 실험값인 0.107 MPa 과 매우 근접한 결과를 나타낸다. 따라서 다항회귀로 도출한 필터 증가모델의 신뢰성을 확보할 수 있었다.

**Table 7 Comparison of CFD analysis by equivalent model and experimental results**

$\dot{V}$ [LPM]	$\Delta P_{Exp.}$ [MPa]	$\Delta P_{CFD,Ergun}$ [MPa]	$\Delta P_{CFD,poly.}$ [MPa]
50	0.0076	0.007 [-11.4%]	0.0079 [+3.9%]
100	0.0192	0.015 [-23.4%]	0.0181 [-5.7%]
150	0.0454	0.031 [-31.9%]	0.0489 [+7.7%]
200	0.0778	0.059 [-24.2%]	0.0722 [-7.2%]
250	0.1067	0.086 [-19.4%]	0.1063 [-0.3%]



**Fig. 10 Comparison of CFD analysis results using equivalent model and experimental data expressed polynomial regression**

#### 4. 결과 및 토의

압력 손실에 대한 실험 결과와 유동해석 결과를 Table 7에 정리하였다. 실험 결과 발생한 압력 손실과 유동해석 결과를 비교하였을 때, 실험결과와 다항회귀로 개발한 등가모델, Ergun 식으로 개발한 등가모델 모두 유사한 경향을 나타내고 있음을 Fig. 9과 10에서 확인할 수 있었다. 다항회귀 등가모델을 적용한 유동해석은 유량이 250 LPM일 때, 약 0.3%의 낮은 오차율을 보였다. 이는 유량의 영역에 따라 저항값을 보정하는 과정에 의해서 오차가 감소한 것으로 고려된다. 따라서 유동해석을 위한 필터 등가모델 개발 시, 다항회귀과정에서 영역을 구

분하여 진행하는 것이 필수적임을 확인할 수 있었다. 수소 브레이크어웨이 디바이스를 통과하는 고압 수소 유량과 압력 조건의 상사성을 고려할 때, 저압 공기에서의 압력 조건이 0.7 MPa, 유량 조건이 약 272 LPM 수준이다. 이는 오차율이 가장 낮은 250 LPM 유량 조건과 유사하다. 따라서 저압 공기 조건의 실험과 해석을 통해 개발한 소결메쉬 필터의 등가모델이 고압 수소 조건에서도 적용 가능할 것으로 고려된다.

Ergun식으로 개발한 등가모델은 비교적 오차가 많이 발생하였는데, 이는 소결메쉬 필터 특성 상 수직 여과율에 높은 비중을 두고 제작하기 때문에 각 층에 대한 메쉬의 크기와 개수가 성적서와 일치하지 않으며, 소결메쉬 필터 제작 시 여러 겹을 쌓는 과정에서 비균일한 영역이 발생할 수 있어 오차가 발생한 것으로 고려된다.

#### 5. 결론

본 연구를 통하여 다음과 같은 결론을 내렸다.

1. 본 연구에서 제안한 소결메쉬 필터의 속도구간별 다공성 등가모델을 적용하여 공극률과 저항 계수를 계산하여 해석적으로 유동특성을 평가할 수 있는 방법을 제안하였다.
2. 다항회귀로 개발한 소결메쉬 필터 등가모델에서 속도구간을 고려한 경우 수소 브레이크어웨이 작동조건과 가장 유사한 250 LPM 유량조건에서 30% 이상의 오차를 감소시킬 수 있으며, 실험결과와 비교하였을 때 0.3%의 낮은 오차율을 확인하여 등가모델에 대한 신뢰성을 평가하였다.
3. 본 연구에서 새롭게 제안한 소결메쉬필터 등가모델을 이용하여 기존에 예측되지 않던 소결메쉬필터에 대한 유동 특성 분석 및 향후 수소 브레이크어웨이 디바이스 개발에 활용하여 유동 구조 최적화를 통해서 새로운 필터형상이나 구조에 대해서 연구할 계획이다.

#### 후 기

“이 논문은 2017년도 정부(교육부)의 재원으로



한국연구재단의 지원을 받아 수행된 기초연구사업 (No.2017R1D1A1A09000923) 및 산업통상자원부(MOTIE)와 한국에너지기술평가원(KETEP)의 지원을 받아 수행한 연구 과제입니다. (No.20173030041340)."

## REFERENCES

1. Jin, Z. J., Chen, F. Q., Qian, J. Y., Zhang, M., Chen, L. I., Wang, F. and Fei, Y., "Numerical Analysis of Flow and Temperature Characteristics in a High Multi-stage Pressure Reducing Valve for Hydrogen Refueling Station", *International Journal of Hydrogen Energy*, Vol. 41, pp. 5559-5570, 2016.
2. Krishna, R., Amgad, E. and Erika, S., "Hydrogen Refueling Station Compression and Storage Optimization with Tube-trailer Deliveries", *International Journal of Hydrogen Energy*, Vol. 39, pp. 19169-19181, 2014.
3. Alazemi, J., Andrews, J., "Automotive hydrogen fuelling stations: An international review", *Renew. Sust. Energ. Rev.*, Vol. 48, pp. 483-499, 2015.
4. Latifa, B. and Mainul, H., "CFD Simulation of a Vertical Direct Chill Slab Caster with a Submerged Nozzle and a Porous Filter Delivery System", *International Journal of Heat and Mass Transfer*, Vol. 73, pp. 42-58, 2014.
5. Tung, K. L., Shiau, J. S., Chuang, C. J., Li Y. L. and Lu W. M., "CFD Analysis on Fluid Flow through Multifilament Woven Filter Cloths", *Separation Science and Technology*, Vol. 37, No. 4, pp. 799-821, 2002.
6. Hanspal, N. S., Waghode, A. N., Nassehi, V. and Wakeman, R. J., "Numerical Analysis of Coupled Stokes/Darcy Flows in Industrial Filtrations", *Transport in Porous Media*, Vol. 64, pp. 73-101, 2006.
7. Gao, X., Zhu, Y. P. and Luo, Z. H., "CFD Modeling of Gas Flow in Porous Medium and Catalytic Coupling Reaction from Carbon Monoxide to Diethyl Oxalate in Fixed-bed Reactors", *Chemical Engineering Science*, Vol. 66, pp. 6028-6038, 2011.
8. Wang Y., Brannock M., Cox S. and Leslie G., "CFD Simulations of Membrane Filtration Zone in a Submerged Hollow Fibre Membrane Bioreactor Using a Porous Media Approach", *Journal of Membrane Science*, Vol. 363, pp. 57-66, 2010.
9. Kim, J. H., Yoon, S. W., Kwon, S. H., Sung, S. H., Bae, M. O. and Kim, J. H., "Study on Filter Efficiency and Lifetime Enhancement by Using Internal Structures", *Journal of the Korean Society of Manufacturing Process Engineers*, Vol. 17, No. 5, pp. 149-154, 2018.
10. Paolo, T. and Riccardo, S., "Minimization of Resistance in Pleated-Media Air Filter Design: Empirical and CFD Approaches", *HVAC&R Research*, Vol. 9, No. 1, pp. 95-106, 2003.
11. Kim, Y. S., Yun, S. M., Shin, H. J. and Ko, S. C., "A Study on the Collecting Efficiency of Oil-mist Filter according to the Sub-filter Shape", *Journal of the Korean Society of Manufacturing Process Engineers*, Vol. 18, No. 1, pp. 16-23, 2019.
12. Benjamin, S. F. and Roberts, C. A., "Three-dimensional Modelling of NOx and Particulate Traps Using CFD: A Porous Medium Approach, *Applied Mathematical Modeling*", *Applied Mathematical Modelling*, Vol. 31, pp. 2446-2460, 2007.
13. Bang, K. H., Kim, K. K., Song, Y. and Kim, P. S., "Numerical Analysis of Fluid Flow and Filtering Efficiency in Centrifugal Oil Filter", *Journal of the Korean Society of Marine Engineering*, Vol. 33, No. 6, pp. 867-872, 2009.
14. Wu, C. Y., Ferng, Y. M., Chieng, C. C. and Liu, C. C., "Investigating the Advantages and Disadvantages of Realistic Approach and Porous Approach for Closely Packed Pebbles in CFD Simulation", *Nuclear Engineering and Design*, Vol. 240, pp. 1151-1159, 2010.
15. Murilo, D. M. I., Vania, R. S., Alvaro, M., Victor, C. P., "Prediction of Ceramic Foams Permeability Using Erqun's Equation", *Materials Research*, Vol. 2, No. 4, pp. 283-289, 1999.