Korean Journal of Air-Conditioning and Refrigeration Engineering
Vol. 25, No. 6 (2013), pp.317-323
http://dx.doi.org/10.6110/KJACR.2013.25.6.317

다공튜브 오리피스 면적비 변화가 출구유동에 미치는 영향

Effect of the Orifice Area Ratio on the Exit Flow of a Multi-Perforated Tube

이상규(Sang-Kyoo Lee)[1], **이지근**(Jee-Keun Lee)[2†]
[1]쌍용자동차(주), [2]전북대학교 기계시스템공학부
[1]*Advanced Engineering Design Team, Ssangyong Motor Co., Gyeonggi-do, 459-711, Republic of Korea*
[2]*Department of Mechanical System Engineering, Chonbuk National University, Chonbuk 561-756, Republic of Korea*

(Received March 8, 2013; revision received April 2, 2013)

Abstract A multi-perforated tube indicates the existence of multiple holes of various shapes on the surface of a long cylinder-type or rectangular tube, and a hole installed on the surface is called an orifice, as it is relatively small in size, compared with the surface area of the tube. In this study, the flow characteristics of a circular multi-perforated tube with many orifices on the surface were investigated experimentally and numerically. The volume flowrate issuing from each orifice, discharge angle, effective flow area ratio, and the flow fields around the orifices were measured and visualized, with the variation of the orifice area ratio, at the same blockage ratio. The volume flowrate distributions along the flow direction of the multi-perforated tube tends to be more uniform, as larger orifices were positioned at the inlet side of the multi-perforated tube, compared with no orifice area change along the flow direction.

Key words Multi-perforated tube(다공 튜브), Orifice flow(오리피스 유동), Flow distribution(유동분포), Area ratio (면적비)

† Corresponding author, E-mail: *leejk@jbnu.ac.kr*

기호설명

D : 다공튜브 직경 [m]
L : 다공튜브 길이 [m]
Br : Blockage ratio
Re : Reynolds 수, $\frac{UL}{\nu}$

그리스 문자

ρ : 밀도 [kg/m^3]
μ : 점성계수 [kg/ms]

하첨자

n : 오리피스 번호

1. 서 론

다공튜브(multi-perforated tube)란 긴 원형 또는 각형 튜브 표면에 다양한 형태의 구멍이 다수 존재하는 것으로, 표면에 설치된 구멍은 튜브 표면적에 비하여 크기가 작아 일반적으로 오리피스라고 부른다. 다공튜브는 표면에 설치된 오리피스 개수 만큼 나누어 유량을 분출하는 유량 분배기 역할을 수행할 수 있어 산업전반에 널리 활용되고 있다.[1, 2]

다공튜브는 다수의 오리피스를 설치하기 위해 비교적 긴 길이를 갖으며 길이방향 압력변화로 인하여 오리피스 사이의 유량이 달라지고 분류의 방출각이 위치에 따라 달라지는 것으로 알려져 있다. 따라서 다공튜브 길이방향에 따라 설치된 오리피스 사이의 유량과 방출각을 예측하고 제어할 수 있는 수학적 관계식을 얻고자 하는 많은 연구가 수행되어 오고 있다.[3-6]

최근 들어 다공튜브가 중요하게 사용되는 분야 중 하나가 대형디젤기관 배기가스 후처리용 Urea-SCR(selective catalytic reduction) 시스템이다.[7-9] Urea-SCR 시스템은 배기가스 오염물질인 NO_x를 저감하기 위한 방법으로써 요소수(Urea-water solution)를 분사장치를 통해 배기관 내에 정밀하게 분사시킨다. 분사된 요소수

는 배기가스 열에 의해 열분해 되어 암모니아(NH_3)로 변환되며, 생성된 암모니아는 SCR 촉매에서 질소산화물(NO_x)과 반응하여 인체에 무해한 물과 질소로 분해하는 원리를 갖고 있다.[10]

Urea-SCR 시스템은 분사장치 및 촉매 등이 머플러와 직렬형태로 배열될 경우 넓은 설치공간을 필요로 한다. 최근에는 설치공간을 최소화하기 위해 촉매를 머플러 내부에 집적화한 SCR 머플러가 널리 사용되고 있다.[11, 12] SCR 머플러는 좁은 공간에 촉매와 소음기가 설치되어 있어 소형화의 장점이 있지만 배기가스의 유동경로가 매우 복잡하여 머플러 내부 유동 특성이 촉매의 NO_x 저감효율에 큰 영향을 끼친다.[13-15] 따라서 머플러 입구와 촉매 사이에 다공튜브를 설치하여 요소수 분무의 열분해에 의해 생성되는 암모니아의 공간분포를 조절하고 NO_x 저감 효율 향상 및 암모니아 슬립을 방지한다. 그러나 다공튜브 오리피스로부터 방출되는 유량은 다공튜브 길이방향에 따라 불균일한 분포를 갖고 있어[3] 요구되는 유량분포를 얻기가 쉽지 않아 다공튜브 형상변화를 통한 유량분포 제어와 관련된 연구의 필요성이 제기되고 있다.

본 연구에서는 다공튜브 측면에 설치된 오리피스의 유량분포 특성이 실험적으로 조사되었으며 해석결과와 비교되었다. 다공튜브 길이방향으로 설치된 오리피스의 유량분포 제어를 위해 오리피스 면적비 변화에 따른 영향이 조사되었다. 또한 PIV(particle image velocimetry) 시스템을 이용하여 오리피스 근처 유동장을 가시화하고 유량분포에 영향을 끼치는 오리피스의 실제 유동면적을 조사하였다. 궁극적으로 다공튜브 오리피스 사이의 유량분배 특성을 제어할 수 있는 설계변수를 찾아 다공튜브가 사용되는 시스템의 성능향상에 기여할 수 있는 방안을 제시하고자 하였다.

2. 실험장치 및 방법

2.1 다공튜브 형상

Fig. 1은 실험 및 해석에 사용된 다공튜브의 형상을 나타낸 것이다. 입구로 유입된 작동유체는 다공튜브의 길이방향으로 유동하며 끝단이 막혀 있으므로 다공튜브의 측면에 설치된 오리피스를 통해 유동방향과 수직한 방향으로 방출되는 구조를 가지고 있다. 다공튜브 전체 길이(L)는 234.98 mm이며 다공튜브 입구로부터 첫 번째 오리피스가 설치된 입구길이(L_{inlet})는 24.0 mm이고 마지막 오리피스로부터 튜브 끝단까지 길이(L_{end})는 27 mm이다. 오리피스 직경(d)은 8 mm이며 오리피스 중심사이의 거리(L_{hole})는 15 mm이다. 다공튜브의 입구직경(D)은 89.1 mm이고 튜브의 두께는 1.5 mm이다. 다공튜브 길이방향 또는 유동방향을 수평방향(H), 길

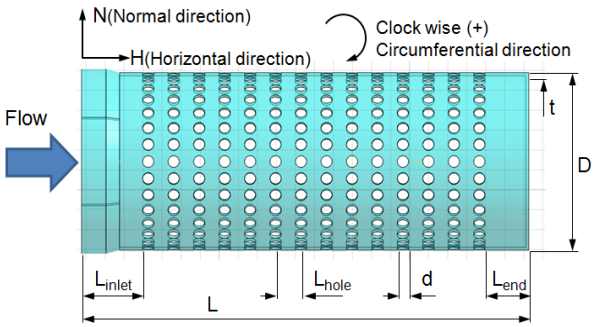


Fig. 1 Schematics of multi-perforated tube.

이방향에 수직한 방향을 수직방향(N)으로 정의하였다. 튜브에 설치되 오리피스의 개수는 길이방향으로 12개가 설치되어 있으며 원주방향으로 21개가 설치되어있어 전체 오리피스 개수는 252개이다. 다공튜브 길이방향에 따른 오리피스 번호는 입구로부터 가장 가까운 지점에 있는 것을 1번으로 정의하고 길이방향에 따라 순차적으로 증가하여 마지막 오리피스를 12번으로 정의하였다. 다공튜브 내부 유동면적을 기준으로 한 표면적과 오리피스 전체면적을 제외한 나머지 면적의 비로 정의되는 차단비(blockage ratio, BR)는 20.3%이며 식(1)과 같이 정의된다.

$$BR(\%) = \frac{A_{tube\ inner\ surface} - A_{orifice}}{A_{tube\ inner\ surface}} \quad (1)$$

2.2 다공튜브 오리피스 면적변화

다공튜브의 오리피스에서 방출되는 유량은 오리피스 면적과 비례관계가 있기 때문에 오리피스 면적을 기준으로 변화시켰다. 오리피스 면적은 다공튜브의 길이방향에 따라 변화되었으며 변화된 면적을 이용하여 오리피스의 직경을 계산하였다. 다공튜브 길이방향에 따른 오리피스 면적은 선행연구 결과[3]와 다공튜브의 기하학적 형상을 고려하여 +40, +20 및 -20으로 변화되었다. +40은 Table 1에 나타낸 것과 같이 직경(d) 8 mm의 면적(A_{8mm})을 기준으로 1번 오리피스의 면적(A_1)을 40% 증가시키고 12번 오리피스의 면적(A_{12})을 40% 감소시킨 다음 두 면적의 차이를 11등분하여 다공튜브 입구길이(L_{inlet})가 끝나는 지점부터 끝단이 시작되는 지점(L_{end}) 사이에 등간격으로 배치한 것을 나타낸다. (+)는 다공튜브 입구에 큰 직경의 오리피스가 설치되고 끝단으로 갈수록 점점 오리피스 직경이 작아지는 것을 의미하고, (-)는 반대로 다공튜브 끝단으로 갈수록 오리피스 직경이 점점 커지는 것을 의미한다. 면적변화에 따른 1번 및 12번 오리피스직경(d_1 및 d_{12})과 변화된 직경에 따른 인접한 두 오리피스 사이의 간격을 Table 1에

ⓒ SAREK

Table 1 Ratio of hole area variation and relating parameters

Area ratio (%)	d(mm)		Hole area	Distance between orifice(mm)	No. of orifice
	d_1	d_{12}			
+40	9.5	6.2	$A_1 = A_8\ mm \times 1.4$ $A_{12} = A_8\ mm \times 0.6$	8.07	252
+20	8.8	7.2	$A_1 = A_8\ mm \times 1.2$ $A_{12} = A_8\ mm \times 0.8$	8.02	
0	8		$A_8\ mm$	8.00	
-20	7.2	8.8	$A_1 = A_8\ mm \times 0.8$ $A_{12} = A_8\ mm \times 1.2$	8.02	

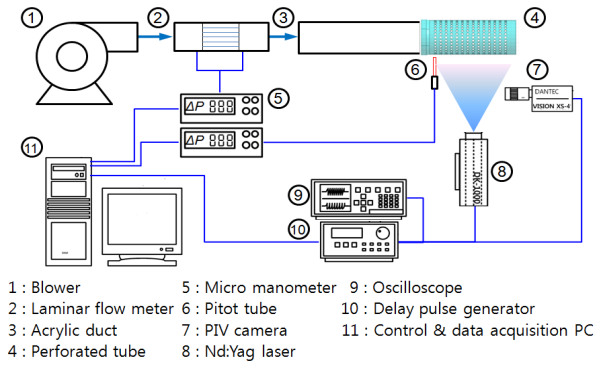


Fig. 2 Experimental setup.

나타내었다. 면적비 변화 효과는 다공튜브 길이방향으로 일정한 직경(d = 8 mm)이 설치되어 면적비 변화가 없는 0으로 표시된 경우와 비교를 통하여 확인하였으며, 면적비 변화와 관계없이 차단비는 20.3%로 동일하다.

2.3 실험장치

다공튜브 오리피스 출구 유량분포 및 출구 주변 유동특성을 조사하기 위해 Fig. 2와 같은 실험장치를 사용하였다. 송풍기로부터 공급되는 공기유량은 덕트 입구에 설치된 층류유량계(Soken LFE-50B) 및 마이크로마노메터(Furness controls, FCO12)를 이용하여 측정하였다. 다공튜브 오리피스 출구 유량은 피토관을 이용하여 측정하였으며 10,000개의 샘플을 이용하여 평균값을 계산하였다. 오리피스 출구 유동장 가시화 및 유동특성은 PIV 시스템(TSI Co.)을 이용하여 조사되었으며 가시화를 위해 스모그 발생기를 사용하였다. 실험은 20℃ 상온에서 원형 아크릴 덕트(③) 입구로 유입되는 공기의 Reynolds 수 6.9391×10^4에서 수행되었다. 이때 덕트 입구의 유량과 평균속도는 각각 0.0730 m^3/s, 11.71 m/s 이며, 작동유체인 공기의 밀도와 점성계수는 각각 ρ = 1.204 kg/m^3, $\mu = 1.81\times10^{-4}$ kg/ms이다.

3. 해석방법

다공튜브 오리피스 출구 유량 및 유동장 해석을 위해 전산해석 상용프로그램 중 하나인 Fluent V6.3을 이용하였다. 해석모델은 Fig. 1에 나타낸 것과 동일하며, 오리피스 면적변화에 따른 기하학적 형상변화는 Table 1에 나타낸 것과 동일한 조건을 적용하였다. 지배방정식은 기상인 공기의 연속상에 대한 오일러리언 연속방정식 및 운동량보존 식으로 이루어져 있으며 상세한 내용은 사용자 지침서를 참조하였다.[16] 배기관 입구 유입속도와 입구 크기를 기준으로 한 레이놀드 수는 최소 5×10^4 이상이므로 난류모델을 사용하였다. 와점성계수 계산을 위한 난류모델은 표준 k-ε 모델을 사용하였다. 해석은 실험에 사용한 조건과 동일한 경계조건을 적용하여 수행하였다.

4. 실험결과 및 고찰

4.1 다공튜브 오리피스 출구 유동특성

Fig. 3은 다공튜브의 오리피스 방출 유량 특성을 조사하기 위해 오리피스 직경이 8 mm일 때 각 오리피스에서 측정한 유량을 입구 유량으로 무차원화하여 나타낸 것이다. 또한 오리피스 출구 유동장에 대한 거동을 알아보기 위해 오리피스 단면의 속도 및 유량분포에 대한 해석 결과를 함께 나타내었다. 다공튜브에 설치된 오리피스는 연속적이지 않지만 유량분포의 경향을 이해하기 쉽도록 연속적인 선으로 연결하여 나타내었다.

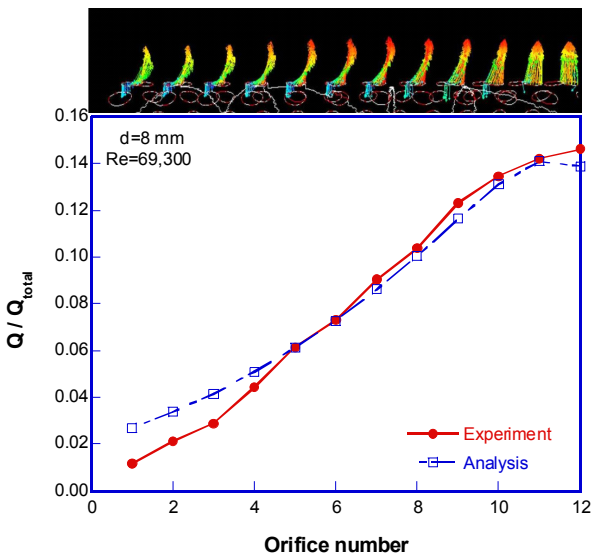


Fig. 3 Volume flowrate distribution along the orifice number at d = 8 mm.

다공튜브 길이방향에 따른 유량 분포는 균일하지 않고 입구로부터 끝단으로 갈수록 점차 증가하는 경향을 보여주고 있다. 해석 결과 또한 입구근처 오리피스에서 다소 높은 값을 보이지만 전반적으로 유사한 증가 경향을 보여주고 있다. 가장 낮은 유량을 보이는 1번 오리피스와 가장 많은 유량을 방출하는 12번 오리피스 사이에 7배 정도의 유량 차이를 보여주고 있어 오리피스 사이의 유량분포의 불균일 정도가 큼을 알 수 있다.

Fig. 4는 다공튜브 길이방향 유량 분포의 원주방향 상사성을 조사하기 위해 반시계방향 90° 간격으로 측정한 오리피스 출구 유량 분포를 나타낸 것이다. 오리피스 출구 유량의 원주방향 변화는 큰 차이를 나타내고 있지 않으며 거의 유사한 분포를 보여주고 있어 다공튜브 내부 유동 및 오리피스 출구 유량분포는 원주방향으로 대칭구조를 갖고 있음을 알 수 있다.

Fig. 5는 다공튜브 오리피스 출구 유동특성을 조사하기 위해 오리피스 직경이 8 mm일 때 각 오리피스에서 방출되는 유량분포를 PIV 시스템과 스모그 발생기를 이용하여 가시화 한 것이다. Fig. 3의 유량분포 특성과 유사하게 다공튜브 길이방향에 따라 방출 유량이 증가하는 것을 관찰 할 수 있으며 방출각 또한 각 오

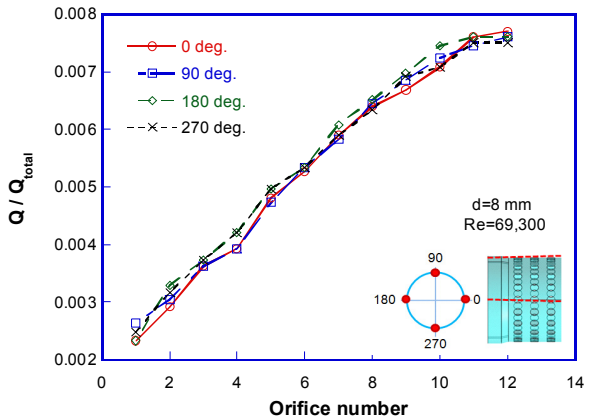


Fig. 4 Volume flowrate distribution along circumferential direction.

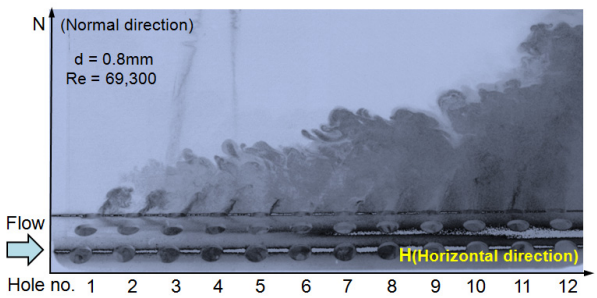


Fig. 5 Visualization of orifice exit flow field.

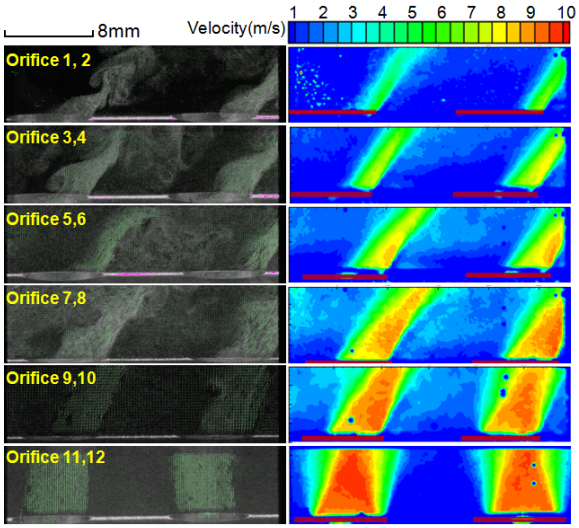


Fig. 6 Iso-velocity contours at each orifice.

리피스 사이에서 변화를 나타내고 있다.

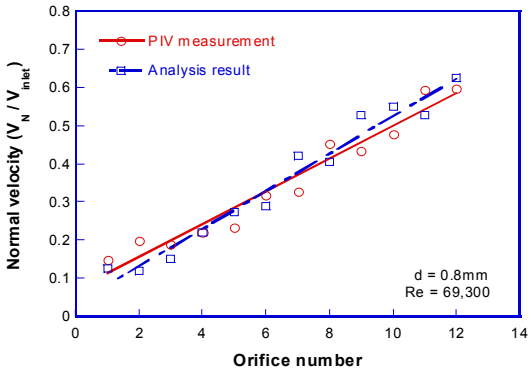
Fig. 6은 각 오리피스로부터 방출되는 분류의 거동을 상세히 관찰하기 위해 두 개의 오리피스에 대한 이미지와 PIV 시스템에서 교차상관법(cross-corelation technique)을 적용하여 얻어진 등속도선도 분포를 함께 나타낸 것이다. 등속도선도 분포에서 알 수 있듯이 유동방향에 따라 속도분포가 점차 큰 값을 나타내고 있으며 다공튜브 입구에서 가장 먼 11번 및 12번 오리피스에서 가장 높은 속도분포를 보여주고 있다. 또한 오리피스로부터 방출되는 분류의 방출각은 입구에서 멀어질수록 점차 수직방향에 가까워짐을 알 수 있다.

Fig. 7은 Fig. 6의 결과를 이용하여 각 오리피스에서 측정한 (a) 수직방향 및 (b) 수평방향 평균 속도분포를 입구속도로 무차원화하여 나타낸 것이다. 평균속도 계산은 오리피스 면적 대신 실제 유동이 발생하는 면적을 기준으로 한 것이다. 오리피스 출구에 수직한 속도분포는 다공튜브 길이방향에 따라 선형적으로 증가하고 있으며 해석결과 또한 유사한 경향을 나타내고 있다. 수평방향 평균 속도분포는 다공튜브 길이방향에 따라 증가하다가 6~8번 오리피스에서 최대값을 보인 후 감소하는 경향을 나타내고 있다. 6~8번 오리피스 이후의 낮은 수평방향 속도는 Fig. 6의 등속도선도 분포에서 알 수 있듯이 분류가 오리피스 면적에 수직한 방향으로 형성되는 것을 의미하는 것으로 Fig. 3에 나타낸 높은 방출 유량과 관계가 있는 것이다.

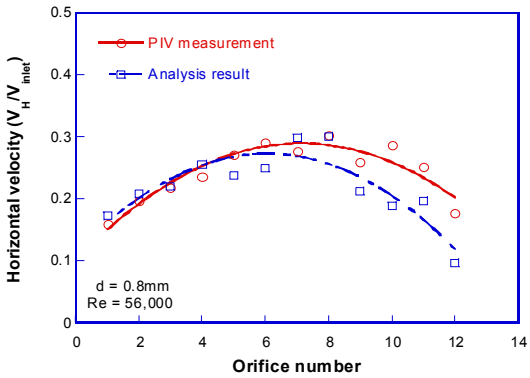
4.2 오리피스 유효유동면적

Fig. 8은 오리피스 출구 유동장 이미지에 오리피스 면적(A_{hole})과 실제로 유동이 존재하는 면적(A_{flow})을 오

ⓒ SAREK



(a) Normal velocity



(b) Horizontal velocity

Fig. 7 Velocity distribution along the orifice number at d = 8 mm.

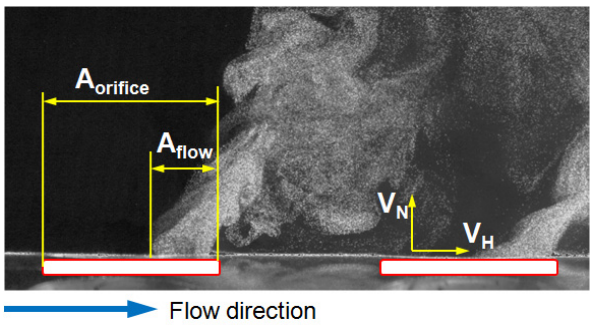


Fig. 8 Definition sketch of effective flow area at orifice exit.

리피스 직경과 함께 나타낸 것이다.

오리피스로부터 방출되는 분류의 유동면적은 오리피스 면적보다 작게 나타나고 있으며 다공튜브 길이방향 쪽으로 치우쳐 있음을 알 수 있다.

이것은 다공튜브 내 유동 관성력으로 인해 오리피스 출구로 방향전환이 쉽지 않기 때문이다.

Fig. 9는 Fig. 8에 나타낸 A_{hole}에 대한 A_{flow}의 비를

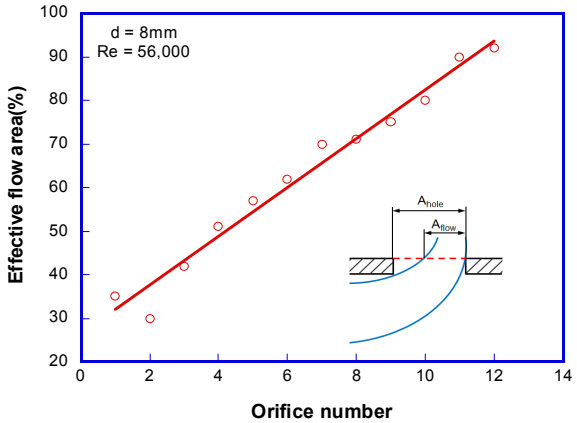


Fig. 9 Effective flow area(%) along the orifice number at d = 8 mm.

유효유동면적비(effective flow area ratio)로 정의하고 각 오리피스에 대한 유효유동면적비를 다공튜브 길이방향에 따라 나타낸 것이다. 유효유동면적은 오리피스의 수축계수(contraction coefficient)와 같은 의미를 가지며 가능하면 클수록 많은 유량을 방출하게 된다. 유효유동면적은 다공튜브 입구에서 길이방향으로 갈수록 거의 선형적으로 증가하고 있다. 1번 오리피스에서 30% 정도를 나타낸 후 선형적으로 증가하여 마지막 오리피스인 12번에서 90% 정도의 값을 나타내고 있어 최대 60% 이상의 차이를 보이고 있다. 이와 같이 선형적으로 증가하는 유효유동면적은 Fig. 3의 유량분포에 영향을 끼치게 된 것으로 보이며, 유효유동면적이 큰 오리피스의 면적변화가 보다 큰 유량변화 효과를 나타낼 것으로 보인다.

4.2 오리피스 면적변화율에 따른 유량분포

Fig. 10은 다공튜브 길이방향으로 설치된 오리피스로부터 방출되는 유량분포를 제어하고 오리피스 전체에 균일한 유동분포를 형성하기 위해 오리피스 면적을 Table 1 나타낸 것과 같이 변화시켰을 때 각 오리피스에 측정한 유량을 오리피스 번호에 대하여 나타낸 것이다. 오리피스 면적변화가 없이 직경 8 mm가 일정한 간격으로 설치된 0으로 표시된 경우는 오리피스 유량분포가 다공튜브 길이방향에 따라 거의 선형적으로 증가하는 경향을 보인 반면, 1번 오리피스 면적이 8 mm 직경의 면적보다 20% 더 크고 길이방향으로 갈수록 점점 오리피스 면적이 작아져 마지막 오리피스 면적이 20% 작은 +20의 경우 8번 오리피스 이후에 점차 감소하는 유량분포를 나타내고 있다. +40의 경우 8번 오리피스 이후의 감소경향이 더욱 두드러지게 나타나고 있으며 1번 오리피스와 12번 오리피스 사이의 차이가 크

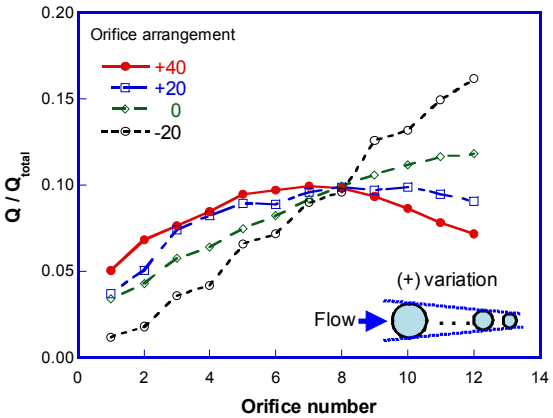


Fig. 10 Volume flowrate with the variation of orifice area ratio.

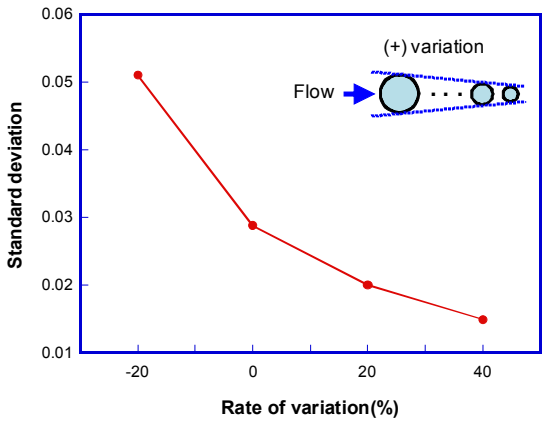


Fig. 11 Standard deviation with the variation of orifice area ratio.

게 감소한 것을 볼 수 있다. 반면 1번 오리피스 면적이 8 mm직경의 면적보다 20% 작고 길이방향으로 갈수록 점점 오리피스 면적이 증가하여 마지막 오리피스 면적이 20% 큰 -20의 경우 오리피스 면적변화가 없는 0의 경우보다 더 큰 오리피스 사이의 유량 차이를 보여주고 있다. 이러한 결과는 다공튜브에 설치된 오리피스 면적비 변화를 통해 오리피스 방출 유량을 조절할 수 있음을 의미하는 것으로 본 연구의 목적인 오리피스사이의 균일 유량분포에 상당히 접근한 결과이다.

Fig. 11은 각 오리피스 사이의 유량차이를 알아 보기 위해 평균값으로부터 산포정도를 나타내는 표준편차를 오리피스 면적변화에 대하여 나타낸 것이다. 오리피스 면적이 길이방향으로 증가하는 -20의 경우 가장 큰 표준편차를 나타내고 있으며 오리피스 면적변화가 +20, +40으로 갈수록 지수적으로 감소하는 경향을 나타내고 있다. 따라서 오리피스 면적비 변화는 출구 유량분포에 영향을 끼칠 뿐만 아니라 다공튜브 길이방향 유량분포의 균일화에 크게 기여함을 알 수 있다.

5. 결 론

다공튜브 오리피스 방출 유량 및 유동장이 실험 및 해석적 연구를 수행하였으며 오리피스 유량분포 조절을 위해 오리피스 면적비 변화 효과를 조사한 결과 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

(1) 오리피스에서 유동이 발생하는 유효유동면적은 다공튜브 길이방향에 따라 선형적으로 증가하는 경향을 나타냈다.

(2) 오리피스 면적에 수직한 속도성분은 다공튜브 길이방향에 따라 선형적으로 증가하며 수평방향 속도성분은 다공튜브 중간지점에서 가장 높은 분포를 그리고 입구와 출구부분에서 낮은 분포를 나타냈다.

(3) 다공튜브에 설치된 오리피스 면적비 변화를 통해 오리피스 출구 유량분포를 조절할 수 있으며, 입구쪽에 설치된 오리피스 면적이 크고 길이방향에 따라 감소하는 오리피스 배열의 경우 각 오리피스의 유량분포가 균일화 되는 경향을 보였다.

참고문헌

1. Ahn, H. B., Lee, S. H., and Shin, S. H., 1997, Flow distribution in manifolds for low Reynolds number Flow, KSME International Journal, Vol. 12, No. 1, pp. 87-95.
2. Foust, J. and Rockwell, D., 2007, Flow structure associated with multiple jets from a generic catheter tip, Experiments in Fluids, Vol. 42, pp. 513-530.
3. Lee, S. K., Moon, N. S., and Lee, J. K., 2012, A Study on exit flow characteristics according to the orifice configuration of multi-perforated tubes, Journal of Mechanical Science and Technology, Vol. 26, No. 9, pp. 2751-2758.
4. Chen, A. W. and Sparrow, E. M., 2009, Effect of exit-port geometry on the performance of a flow distribution manifold, International Journal of Applied Thermal Engineering, Vol. 29, pp. 2689-2692.
5. El Moueddeb, K., Barrington, S. F., and Barthakur, N., 1997, Perforated ventilation ducts : Part 1. A model for air flow distribution, Journal of Agricultural Engineering Research, Vol. 68, pp. 21-27.
6. Singh, R. K. and Rao, R. A., 2009, Simplified theory for flow pattern prediction in perforated tubes, Nuclear Engineering and Design, Vol. 239, pp. 1725-1732.

ⓒ SAREK

7. Johnson, T., 2007, Diesel emission control in review, SAE Technical Paper 2007-01-0233.
8. Heering, H. P., Onder, C. H., Elsener, M., and Schaer, C. M., 2003, Control of a urea SCR catalytic converter system for a mobile heavy duty diesel engine, SAE Technical Paper 2003-01-0776.
9. Zhang, X. and Romzek, M., 2007, 3-D Numerical study of flow mixing in front of SCR for different injection systems, SAE Technical Paper 2007-01-1578.
10. Huang, Z., Zhu, Z., Liu, Z., and Liu, Q., 2003, Formation and reaction of ammonium sulfate salts on V_2O_5/AC catalyst during selective catalytic reduction of nitric oxide by ammonia at low temperatures, Journal of Catalysis, Vol. 214, pp. 213–219.
11. Plassat, G., Pichon, G., Vonarb, R., and Rocher, L., 2007, Fuel-borne catalyst assisted DPF regeneration on a renault truck MD9 engine outfitted with SCR, SAE Technical Paper 2007-01-1934.
12. Ahn, T. H. and Kim, M. Y., 2012, A numerical study on the flow characteristics in the catalystic muffler with different inlet geometry, Proceedings, KSAE, pp. 301-306.
13. Jeong, S., Lee, S., Kim, W., and Lee, C., 2005, Simulation on the optimum shape and location of urea injector for urea-SCR system of heavy-duty diesel engine to prevent NH_3 slip, SAE Technical Paper 2005-01-3886.
14. Birkhold, F., Meingast, U., Wassermann, P., and Deutschmann, O., 2006, Analysis of the injection of urea-water-solution for automotive SCR DeNOx-systems : Modeling of two-phase flow and spray/wall-interaction, SAE Technical Paper 2006-01-0643.
15. Karlsson, M., Wallin, U., Fredholm, S., and Jansson, J., 2006, A combined 3D/Lumped modeling approach to ammonia SCR after-treatment systems : Application to mixer designs, SAE Technical Paper 2006-01-0469.
16. Fluent User Guide. 6.2, The RNG k-e model, pp. 11-17.

ⓒ SAREK