

## 수치적 열유동 해석을 통한 마이크로 희석챔버의 개선

김성훈† · 이동렬\*

(원고접수일 : 2009년 6월 8일, 원고수정일 : 2009년 7월 13일, 심사완료일 : 2009년 7월 20일)

### Numerical Investigation of Thermo-Fluid Flow for Improvement of Micro-Dilution Chamber on Particulate Deposition

Sung-Hoon Kim† · Dong-Ryul Lee\*

**Abstract :** The main purpose of this study lies on the improvement of micro dilution tunnel based on the typical porous tube type chamber. The characteristics of flow and temperature fields for steady state has been obtained by numerical analysis using FLUENT. Three different geometrical variations of the porous tube: a) increase of thickness at center, b) step increase of thickness at center and downstream, c) tapered increase of thickness, have been proposed. Accordingly results are obtained and compared in terms of penetration velocity and velocity ratio to thermophoretic velocity for improvement against particulate deposition inside the tube. The penetration velocity and velocity ratio distributions in the upstream portion and portion of impinging of dilution air are apparently shown to be improved for the case of the step and tapered change of porous tube. The tapered change of tube thickness addition are shown to be the most effective among three geometrical changes. In addition, the considerable improvement against deposition are shown that its thickness should be at least 2mm.

**Key words :** Micro-Dilution chamber(마이크로 희석챔버), Particulate matter deposition(매연 물질 흡착), Porous tube(다공튜브), Dilution air(희석공기)

#### 1. 서 론

최근 지구 환경문제에 관심이 증가하면서 엔진 배기가스에 의한 공기의 오염 및 인체에 대한 심각한 영향으로 배기가스에 대한 규제가 강화됨에 따라 유해 물질의 기술적인 제거와 효과적인 정화를 위한 기술개발이 관련기업들에 의하여 추진되고 있

다. 특히 디젤엔진 배출물질인 매연물질(PM)은 탄화수소계열 연료의 불완전 연소로부터 생성되며 주로 산에 의해 용해되지 않는 추출이 불가능한 탄소성 물질(Soot)과 산에 의해 용해와 추출이 가능한 용해성 유기물질로 정의되는 탄화수소계열의 물질로 구성되어 있다.

희석터널은 디젤엔진에서 배출가스가 대기로 배

† 교신저자(계명대학교 기계자동차공학과, E-mail:shkim@kmu.ac.kr, Tel:053-580-5458)

\* 대구카톨릭대학교

출되는 상황을 동일한 조건으로 매연물질의 중량을 측정하는 시스템이며 현재까지 국내의 자동차관련 업체나 관련 연구기관에서는 주로 국외에서 생산된 희석터널을 사용하고 있다.

희석터널시스템에서 장치의 정밀도 및 신뢰도를 확보하기 위한 핵심부품은 희석챔버 부분으로서, 엔진으로부터 배출된 매연물질을 희석공기로 적절히 희석함으로써 배출된 매연물질이 챔버 내벽에 부착되지 않고 전량 여과지에 포집되도록 설계되어야 한다. Fig. 1은 이러한 형태의 대표적인 희석챔버 구조를 보여주고 있으며 본 연구에서는 Fig. 1에서 보는 바와 같은 기존의 표준 조건(일정한 두께의 다공튜브)의 희석챔버의 해석 방법<sup>1)</sup>을 바탕으로 제기된 문제점을 해결하기 위해 개선된 성능의 희석챔버를 개발하는 것을 목표로 하였다. 기존의 마이크로 희석챔버의 구조는 배기가스를 sampling하는 튜브와 이를 희석시키기 위한 공기를 공급하는 부분으로 구성되어 있다. 배기가스는 sampling probe를 통해 희석터널의 유입구로 유입되며 중공 다공질 관을 지나면서 다공튜브를 통과하는 공기와 섞여 희석되며 출구로 유출된다. 기존의 마이크로 희석챔버<sup>1,5-8)</sup>는 일반적으로 동일한 두께의 다공질 튜브가 사용되었으며 이에 대한 열유동 특성 해석<sup>1)</sup>에 의해 입자퇴적의 판단기준에 따라 다공튜브 중 희석공기가 충돌하는 다공튜브의 중앙부분과 상류부분에서 퇴적 가능성에 대한 문제를 제시한 바 있다. 따라서 본 연구에서는 희석공기 공급부분과 모래 재질의 다공튜브의 상류 및 하류부에 두께와 형태를 조절하고 이의 영향을 온도 및 유동장의 수치해석을 통하여 결과를 분석하고 성능개선 가능성을 검토하여 개발에 적용하고자 한다.

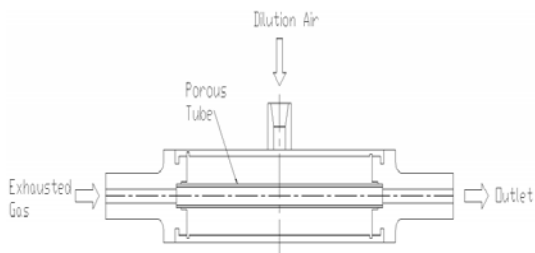


Fig. 1 Schematics of micro dilution chamber

Table 1 Detailed specifications on dilution tunnel

(mm, mm <sup>2</sup> )	O.D.	I.D.	t	area	length
porous tube (Stainless steel)	15	12.3	1.35	118.823	116
chamber	-	38	-	-	-
gas side	-	9.2	-	66.476	-
air side	-	20	-	314.159	-

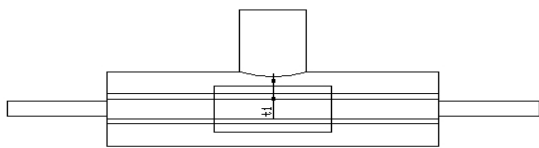
## 2. Dilution Tunnel의 개선된 모델링

Table 1은 현재 사용되고 있는 표준상태의 희석터널 및 다공튜브의 기하학적 자료를 제시한 것이며 다공튜브는 일정한 두께의 튜브로 구성되어 있다. 본 연구에서 제안하는 다공튜브의 기하학적 특성은 앞서 언급한 문제점을 즉, 희석공기가 충돌하는 다공튜브의 중앙부분 및 다공튜브 상류에 튜브 내외부의 압력차이가 작아 발생하는 문제를 최소화하는 방법으로서 3가지 방법을 검토하였다. 모든 방법은 희석공기가 충돌하는 부분의 다공질 두께를 증가시키고 하류부의 다공질 두께를 상류부보다 크게 하여 침투속도( $V_0$ )와 침투 속도 비( $V_0/V_T$ )의 분포를 가능한 한 일정하게 유지시켜 입자퇴적에 대한 안정성을 확보하고자 함이다. Fig. 2는 각각 희석공기가 충돌하는 중앙부분의 두께를 증가시키는 방법으로서 (a)다공튜브의 중앙부의 두께를 증가시키는 방법 (b)중앙부분의 두께와 동시에 하류부의 두께를 계단 형으로 증가시키는 방법 (c)중앙부의 두께와 동시에 하류부의 두께를 테이퍼로 증가시키는 방법을 고려하였다. Table 2는 기하학적 형태의 변형에 따른 두께 변화를 제시하였으며 표에 제시된 값은 표준형 다공튜브를 기준으로 한 두께 증가 값을 제시한 것이다.

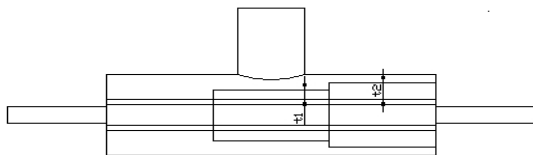
희석공기가 충돌하는 다공튜브의 중앙부는 각각 1, 2mm의 두께를 증가시켰으며 단계별 혹은 테이퍼 형태로 상류부의 다공튜브의 두께를 중앙부 두께 1, 2mm는 물론 하류부의 두께를 2, 4mm로 증가시켰다. 다공튜브의 두께변화는 전체 다공튜브의 축방향의 길이를 3등분하여 고려하였다. 두께변화에 대한 공칭은 튜브의 중앙 두께 증가를 기준으로 1mm 혹은 2mm 증가로 표현한다.

**Table 2 Design modification in porous annulus**

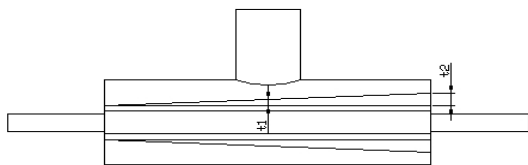
case	geometry variation	thickness( $\Delta t$ ) (mm)
standard	Table 1	-
center	Fig.2(a)	$\Delta t_1$ : 1, 2
step	Fig.2(b)	$\Delta t_1 - \Delta t_2$ : 1 - 2, 2 - 4
taper	Fig.2(c)	$\Delta t_1 - \Delta t_2$ : 1 - 2, 2 - 4



(a) Add thickness at tube center



(b) Step variation of thickness



(c) Tapered variation of thickness

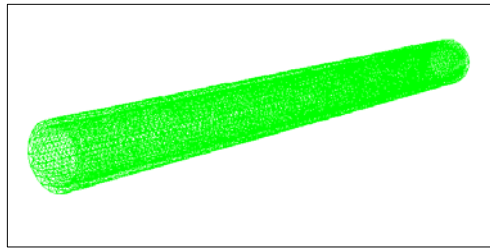
**Fig. 2 Thickness variation in porous tube**

### 3. 수치해석

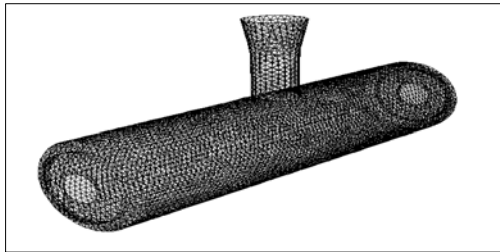
본 연구에서 회석챔버의 공기 및 다공튜브 내부의 열유동 해석은 3차원 정상상태의 지배방정식을 사용하였으며 이에 대한 자세한 이론식 및 관련 경계조건 등에 대한 내용은 참고문헌<sup>1)</sup>에 자세히 서

술되어 있다. 회석터널의 3차원 형상의 복잡성은 물론 내부에 다공질 영역으로 인해 본 연구에서는 회석터널 내 유동 및 온도장 해석을 위해 상용소프트웨어인 FLUENT를 사용하였다. 본 해석에서는 비정렬 격자구조를 사용하였으며 대류항의 처리방법은 power law 방법을 사용하였다. 운동량 방정식에서 속도-압력은 SIMPLE 알고리즘을 택하였다.

Fig. 3는 회석터널의 전체적인 볼륨Mesh 및 대표적인 다공튜브의 Mesh 상태를 보여주고 있다. 모든 격자의 생성은 고체 벽 근처에서는 높은 속도구배의 변화로 인해 격자를 조밀하게 형성하였으며 약 3만개의 격자를 사용하였고, 특히 본 연구의 목적 중의 하나인 다공질 관내의 유동 및 온도장을 정확히 해석하기 위해 주유동과 접하는 부분의 다공질 관 격자 역시 조밀하게 형성하였으며 약 1만5천개의 격자로 구성하였다. 총 셀의 개수는 약 18만개를 사용하였으며 전체 질량 및 에너지 balance식이 0.2%를 만족할 때 수렴을 선언하였다. 물체의 물성값은 주어진 재질로서 결정하였다. 즉, 대표적인 배기가스 유입온도는 500℃이며 회석 공기의 온도는 20℃로서 이들 주어진 값을 사용하였으며 따라서 배기가스 및 회석공기의 물성값은 이들의 평균온도인 260℃를 기준으로 한 공기의 물성값을 사용하였다. 다공질 관의 재질은 porous sand의 물성치를 고려하였다. Table 3은 본 해석에 사용된 재질의 물성치를 나타낸다. 다공질로 주어진 물성치는 입자의 평균 직경으로  $2 \times 10^{-6}$  inch가 주어져 있다. 제품(Mott제품) 카다로그<sup>9)</sup>에 제시된 압력강하와 본 해석에서 구한 압력강하를 비교한 결과는 일치하였으며 그 결과 역시 참고문헌<sup>1)</sup>에 서술되어 있다. 본 해석의 유량범위는 회석공기 유량을 기준으로(회석공기유량 = 92 liter/min) 배기가스와의 비를 각각 6:1 및 14:1의 2가지 경우를 해석하였으며, Table 4는 해석에 사용된 유량(유속) 및 온도 등을 제시하였다.



(b) Tapered porous tube



(a) Dilution chamber

Fig. 3 Typical grid of tube and chamber

Table 3. Thermophysical properties of materials

	$\rho$ $Kg/m^3$	$C_p$ $J/ kg \cdot K$	$k$ $W/ m \cdot K$	$\mu$ $kg/ m \cdot s$
air	0.6297	1.04066	0.04408	289.444
porous tube	2640	820	5.345	-

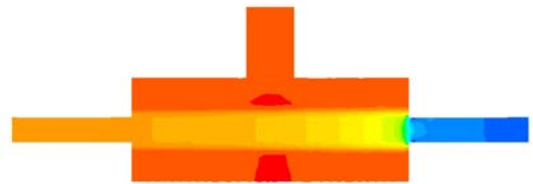
Table 4. Input values for numerical analysis

ratio of dilution air and exhausted gas	6:1		14:1	
	air	gas	air	gas
flowrate [liter/min]	92	15.3	92	6.6
velocity [m/s]	4.92	4.02	4.92	1.73

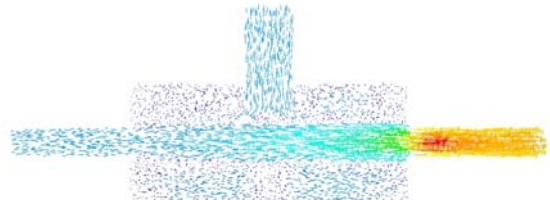
#### 4. 결과 및 고찰

매연 흡착은 다공튜브내 속도장 및 온도장에 의해 결정되므로 전체적인 유동 및 온도장에 대한 정성적인 결과를 이해할 필요가 있다. 본 연구에서 사용된 파라미터 범위에서 이들 결과는 정량적인 차이가 나타나나 정성적으로는 매우 유사하기 때문에 정량적인 비교에 앞서 수직단면에서 유동장(압

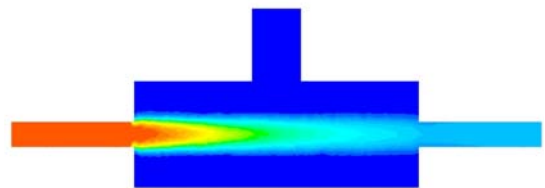
력과 속도벡터)과 온도장의 Contour를 Fig. 4에 제시하였다. 챔버 내 압력분포에서 보듯이 챔버 상부로부터 희석공기가 공급되어 다공질 튜브를 거쳐 다공질 내부로 관통된다. 희석공기는 체트류를 형성하여 다공질 벽에 부딪치며 이때 충돌지점에서 상당한 압력이 상승한다. 배기가스가 흐르는 주유동의 속도는 입구에서부터 하류로 진행됨에 따라 다공질 벽을 관통하는 희석공기로 인해 점차 증가함을 알 수 있다. 한편 높은 온도의 주유동은 관통된 희석공기로 인해 점차 희석되며 온도는 점차적으로 감소함을 알 수 있다. 서술한바와 같이 대부분의 경우 같은 유동특성을 갖게 되며 따라서 아래의 정량적인 비교를 통해 희석챔버의 개선의 가능성을 살펴보고자 한다.



(a) Pressure



(b) Velocity vector



(c) Temperature

Fig. 4 Typical distributions of pressure, velocity, and temperature for tapered porous tube inside chamber(flowrate 6:1, 2mm tube thickness)

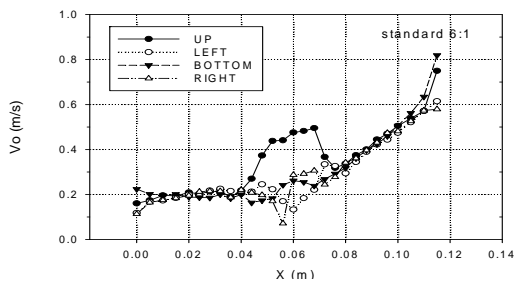
4.1 표준모델의 침투속도 및 속도비

대표적인 유동장의 정량화된 특성을 비교하기 위해 Fig. 5와 같이 다공질 관내부의 축 방향에 대한 다공튜브 벽에서 회석공기의 침투속도 분포를 도식하였다. Fig. 5(a),(b)는 각각 유량비가 6:1, 14:1인 경우 표준상태(Table 2 참조)의 결과이다. 다공질 관을 통과하는 회석공기는 다공질 벽 중 원주방향으로 네 위치를 택해 흐름방향의 침투속도를 검토하였다. 여기서 4가지 위치는 다공질관의 상부(노즐부 방향:up),하부방향(bottom),좌(left),우(right)의 위치를 선정하였다. 다공튜브의 두께가 일정한 표준상태에 대해서는 참고문헌<sup>1)</sup>과 같은 정성적인 결과를 보이고 있어 여기서는 간단히 언급하고자 한다. 일반적인 침투속도는 상류부에서 최소값을 유지하며 하류로 진행할수록 점차 증가하여 출구에서 최대값을 이룬다. 이는 다공질 관내의 압력이 축 방향으로 진행될수록 감소되는 반면 다공질 관 외부에는 비교적 일정한 압력을 유지하기 때문에 회석공기의 침투속도는 축 방향에

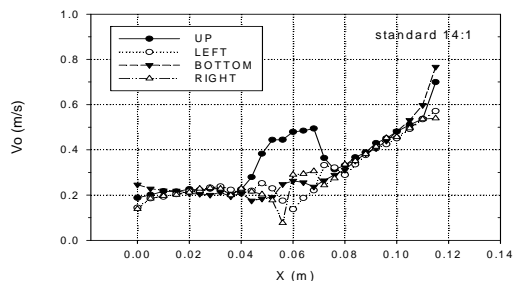
따라 자연히 증가하게 된다. 한편 회석공기가 충돌하는 부분의 원주방향의 속도는 큰 차이를 보이고 있다. 다공튜브의 상부 부분(up)에서의 침투속도는 매우 증가하고 그 반대 방향의 위치(bottom)에서도 약간의 증가를 보이나 측면에서 침투속도는 매우 감소하는 것을 볼 수 있다.

회석터널 시스템에서 무엇보다 중요한 사항은 먼저 sampling 시간을 줄이고 또한 배기가스 중 매연 흡착을 방지하여야 한다. 이와 같이 흡착을 판단하는 물성치의 판단기준은 다공질 관을 침투하는 회석공기의 속도와 소위 Thermophoretic 속도의 비로서 판단할 수 있게 된다. 즉, 회석공기의 침투속도가 Thermophoretic 속도보다 클 경우 매연 흡착은 발생하지 않는다<sup>6)</sup>. Thermophoretic 속도는 다공튜브 내부 벽에서의 온도와 반경방향의 온도구배에 의존하며 Thermophoretic 속도( $V_T$ )를 구하는 식은 식 (1)과 같다.

$$V_T = \frac{3\mu}{4\rho(1 + \pi a/8)} \cdot \frac{\nabla T}{T} \tag{1}$$

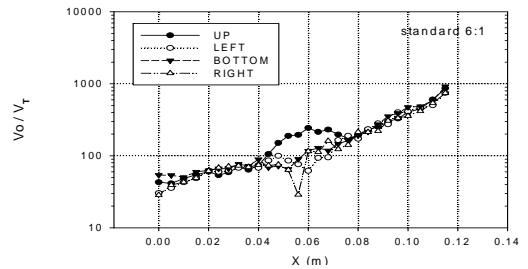


(a) Flowrate ratio 6:1

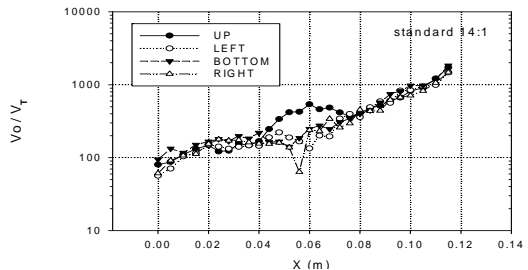


(b) Flowrate ratio 14:1

Fig. 5 Penetration velocity of dilution air in x direction at four different positions



(a) Flowrate ratio 6:1



(b) Flowrate ratio 14:1

Fig. 6 Streamwise distributions of Penetration velocity and Thermophoretic deposition velocity ratio at four different positions (standard condition)

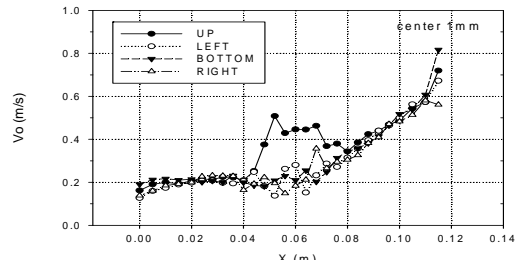
여기서  $\rho$ ,  $\mu$  는 배기가스의 밀도 및 점성계수이며,  $a$ 는 thermal accommodation 계수로서 1에 가까운 값을 갖는다.  $\nabla T$ 는 반경방향의 온도 구배이며  $T$ 는 다공질 벽에서 절대온도이다. 회석공기의 침투속도와 thermophoretic 속도의 비 ( $V_o/V_T$ ; 이하 속도비)가 1보다 크게 유지되면 배기가스의 입자 흡착이 발생하지 않으며 이 보다 작으면 흡착이 발생한다고 판단한다. Fig. 6에 의하면 전체적인 유량비에서 이 속도비는 입구부에서 최소를 이루며 축 방향으로 진행될수록 증가함을 알 수 있다. 전체적으로 이 속도비는 1보다 커 일반적으로는 흡착에 대해 안전하다고 할 수 있다. 그러나 전반적으로 양 측면에서 회석공기가 부딪치는 부분에서는 속도비가 매우 감소하는 경향을 나타낸다. 이 부분에서 속도비의 마진( $\sim 10$ )은 비교적 커서 흡착에 대해 안전한 듯하나 침투속도(Fig. 5)분포에서 보듯이 비정상 흐름의 요인이 발생할 경우 매우 작은 침투속도의 변화에도 이와 같은 속도비는 급격한 값의 변화를 초래할 수 있다. 그림과 같이 유량 비에 대한 속도비를 살펴볼 때 유량비가 낮을수록(6:1) 속도비 값이 작아지므로 유량비가 큰 경우(14:1)보다 흡착에 대한 안전 면에서 더 불리함을 알 수 있다. 이는 전체 해석영역에 동일하게 적용되므로 개선된 모델에 대한 고찰에서는 유량비가 작은 6:1의 경우에 대해서만 비교를 하고자 한다.

4.2 개선 모델의 침투속도 및 속도비

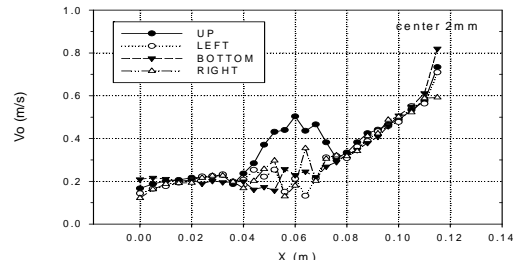
매연물질 흡착을 결정하는 기준으로 공기침투속도 및 속도비를 제시하여 이들의 변화로서 회석챔버의 성능을 평가할 수 있게 된다. 따라서 여러 파라미터 중 본 연구에서 제시한 다공튜브의 두께변화에 대한 영향을 분석하고자 한다.

4.2.1 다공튜브 중앙부 두께변화의 영향

Fig. 7 및 Fig. 8은 유량비 6:1일 때 다공튜브 중앙부두께를 증가시켜 침투속도와 속도비의 분포를 나타낸 것이다. 비록 중앙부의 다공질관의 두께를 키워도 전반적으로 회석공기의 제트류 충돌로 인한 침투속도의 분포는 표준상태에 비해 크게 변하지 않는다.

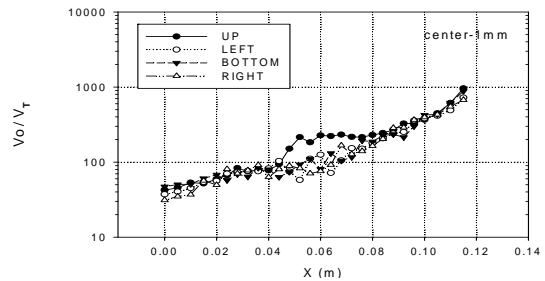


(a) 1mm

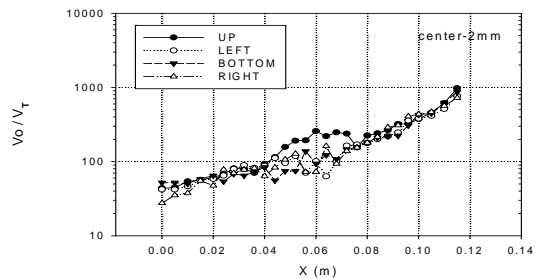


(b) 2mm

Fig. 7 Streamwise Penetration velocity distribution for different thickness at center of porous tube



(a) 1mm



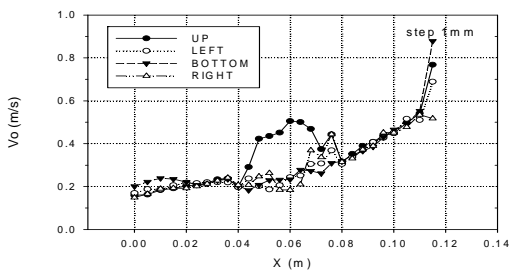
(b) 2mm

Fig. 8  $V_o/V_T$  distributions in x direction for different thickness at center of porous tube

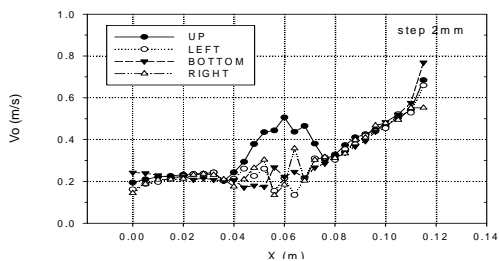
그러나 두께가 두꺼워질수록 제트류로 인한 침투 속도는 제트류가 충돌하는 부분에서 다소 감소되고, 중앙부에서 발생하는 최저 침투속도는 다소 증가하여 전체적으로 중앙부의 원주방향에 따른 속도 차이를 줄이는 효과가 나타난다. 마찬가지로 속도비 분포에서도 두께증가에 따라 중앙부의 속도비가 전체적으로 약간 증가해 안전한 방향으로 가고 있음을 알 수 있다. 그러나 중앙부에 1-2mm 두께를 증가시키는 방법으로 그 효과는 최소화되며 전체적인 관통속도나 속도비의 분포는 크게 변하지 않는다.

4.2.2 다공튜브 단계적 두께변화의 영향

중앙부 두께를 증대시킨 다공튜브의 해석 결과에 나타나듯이 중앙부의 두께증대로 인한 영향이 최소로 나타나 전체적인 침투속도 및 속도비에 크게 영향을 미치지 못한다. 따라서 하류에서는 침투속도 및 속도비는 줄이고 상류의 침투속도 및 속도비를 증대시키며 중앙부의 원주방향의 속도 분포를 일정하게 하고 전체적인 속도비의 값을 크게 하기 위한 목적을 달성하기 위해 다공튜브의 중앙부뿐만 아니라 하류부에도 다공튜브의 두께를 증대시킬 필요가 있다.

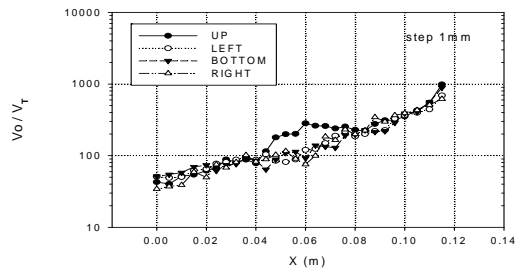


(a) 1mm

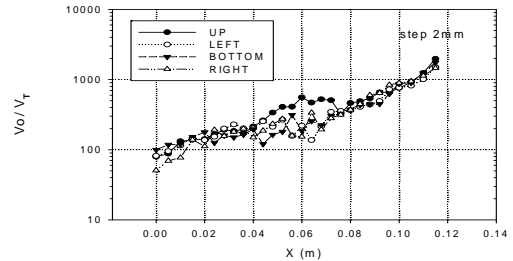


(b) 2mm

Fig. 9 Penetration velocity in x direction for step variation of thickness in a porous tube



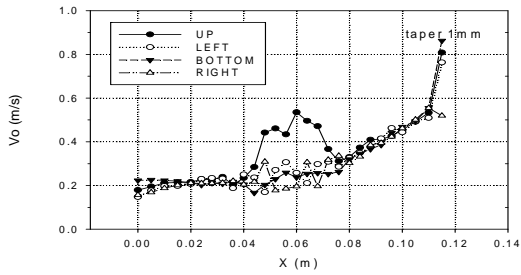
(a) 1mm



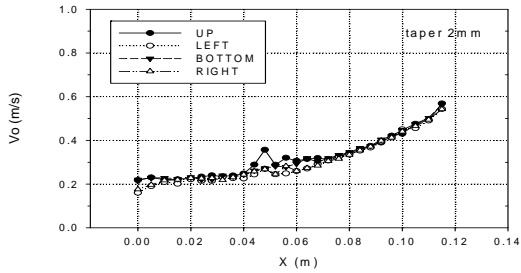
(b) 2mm

Fig. 10  $V_o/V_T$  distributions in x direction for step variation of thickness in a porous tube

이와 같은 이유로 다공튜브 두께의 단계적 변화를 시도 하였다. 중앙부의 두께를 고정시키고 그 하류부(축길이의 1/3)의 다공튜브 두께를 중앙부의 2배로 증가시켰다. Fig. 9 및 Fig. 10에서 보듯이 예측한대로 중앙부의 변화는 중앙부만 변화시킨 경우에 비해 침투속도의 최소값은 다소 증가하고 있으며 하류부에서 침투속도의 감소로 인해 상류부의 침투속도가 커지는 경향을 보인다. 특히 전체적인 경향은 다공튜브의 두께가 클수록 커진다. 한편 이와 같은 경향은 속도비 분포에서도 더욱 뚜렷이 나타난다. 상류에서 표준상태에서 속도비는 약 30~55 범위이며 1mm의 두께 증대에서 다소 상승하며 2mm의 두께증대에서는 약 55~100의 값으로 증가된다. 또한 중앙부의 속도비 역시 안정적으로 그 값이 커지며 2mm인 경우에는 중앙부의 최소값 역시 증가하는 것을 알 수 있다. 이와 같은 변화는 상류부와 다공튜브의 중앙부에서 특히 매연 흡착이 발생할 가능성을 낮추어 매우 긍정적인 변화로 생각된다. 따라서 현재의 제안(상류부의 두께 보다는 하류부의 두께를 두껍게 하는 것)은 상당히 성공적이라 할 수 있다. 그러나 중앙부에서 원주방향의 침투속도 차이는 계속 나타나고 있다.



(a) 1mm



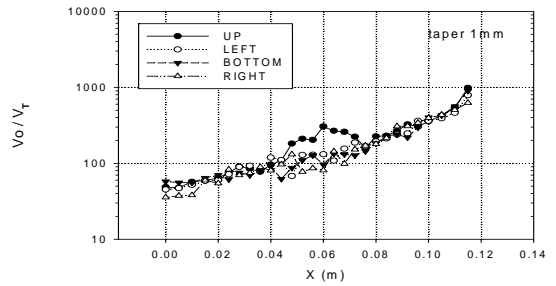
(b) 2mm

Fig. 11 Penetration velocity in x direction for tapered variation of thickness in a porous tube

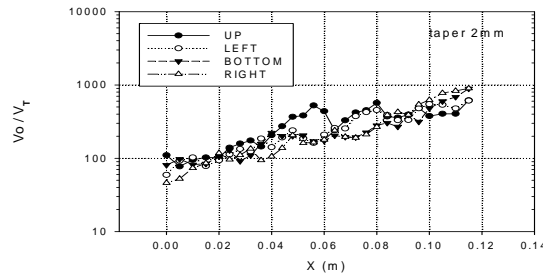
4.2.3 다공튜브 연속적 두께변화의 영향

다공질 관의 두께의 단계적 변화에 대한 영향 분석을 바탕으로 다공질 관의 연속적 두께 변화 (taper)를 시도하였다. Fig. 11 및 Fig. 12에 의하면 다공질 관의 중앙부 두께가 1mm (최대두께 2mm)인 경우 침투속도와 속도비의 형태는 같은 두께의 단계적 두께변화의 경우와 거의 유사하다.

그러나 중앙부두께를 2mm(최대두께 4mm)로 증가시킬 경우 다공튜브의 연속적 두께변화 영향이 나타나기 시작한다. 즉, 희석공기가 충돌하는 중앙부에서 최대 및 최소의 침투속도 차이가 작아지고 또한 표준 다공튜브에 비해 축방향 침투속도의 분포가 상류부에서는 증가하고 하류부에서는 감소하여 상당히 일정한 분포로 변함을 알 수 있다. 또한 중요한 사실은 속도비 분포에서도 이와 같은 현상이 나타나며 다공튜브에 걸쳐 전체적으로 속도비가 증가함에 따라 매연 흡착의 안정성이 상당히 증가했음을 알 수 있다. 실제 같은 두께를 증가시킨 단계적 두께 변화의 다공튜브 경우와 비교할 때



(a) 1mm



(b) 2mm

Fig. 12  $V_o/V_T$  distributions in x direction for tapered variation of thickness in a porous tube

1mm의 경우는 큰 차이가 없으나 2mm인 경우에는 단계적 두께를 증가시킨 경우 보다 속도비가 상류에서 약간 작고 하류에서는 약간 크다. 이는 다공튜브의 하류부에서 연속적 두께변화의 경우 단계적 두께변화의 경우보다 그 축방향에 따른 유효두께가 더 작기 때문인 것으로 생각된다. 그러나 실제 침투속도를 검토할 때 단계적 변화를 이용한 두께 증대 보다는 연속적 두께 변화를 사용한 두께 증대가 더욱 효과적임을 알 수 있다.

5. 결 론

희석터널시스템에서 설계의 정밀도 및 신뢰도를 확보하기 위해 핵심부품인 희석챔버 부분의 다공튜브에서 희석공기의 침투속도와 속도비의 영향을 분석하여 챔버설계의 개선을 시도하였다. 개선을 위해 다공튜브의 모양과 두께를 변경하였으며 그 결과는 다음과 같다.

- 1) 두께가 일정한 다공튜브에서 희석공기와 배



기가스의 유량비가 작을수록 입자 흡착 안정성이 감소하였으며 동일한 유량비에서는 다공튜브의 상류부와 회석공기가 충돌하는 부분에서 최소값을 나타내어 가장 적은 여유의 안정성을 가지고 있다.

2) 설계 개선을 위해 다공튜브의 중앙부의 두께 증가, 단계적 두께증가, 연속적 두께증가의 3가지 경우의 결과를 제시하였으며 각 경우 침투속도와 속도비 결과의 분석을 통해 상류부에서 침투속도와 속도비를 증가시켰으며 하류부에서 감소시킬 수 있었다. 또한 회석공기의 제트류가 충돌하는 부분의 최소값들을 증대시켜 입자 흡착의 안정성을 증가시켰다.

3) 본 연구의 각각의 제안 모델 중 다공튜브의 두께는 최소한 2mm 이상일 경우 개선효과가 나타나며 두께가 연속적으로 변하는 다공튜브의 설계 모델이 가장 효과적으로 매연입자 흡착을 방지할 수 있는 모델임을 밝혔다.

## 참고문헌

- [1] 김태권, 김성훈, 임문혁, “디젤매연측정용 마이크로 회석터널의 회석챔버에서의 열유동특성,” 한국자동차공학회논문집, 제10권, 제6호, pp. 90-99, 2002.
- [2] 신동길, 이진욱, 정용일, 김해룡, “디젤 입자상 물질 측정을 위한 마이크로 회석터널시스템 내 주요인자별 특성해석,” 한국자동차공학회 추계 학술대회 논문집, 1호, pp. 248-253, 1999.
- [3] 정민원, 이진욱, 정용일, 차경욱, 윤진욱, “엔진 배출 나노PM 입자계측용 응축핵 개수기 (CPC) 특성 비교 해석,” 한국자동차공학회 춘계 학술대회 논문집, Vol. I, pp. 477-482, 2007.
- [4] 이진욱, 정민원, 정용일, 차경욱, “디젤 승용차량 시험모드별 극미세입자 배출 특성 해석,” 한국자동차공학회 논문집, 제 16권, 제 1 호, pp. 114-120, 2008.
- [5] R. R. Graze, Jr., United States Patent, Patent Number 5058440, Oct., 22, 1991.10. Sierra Product Manual, 1997.
- [6] R. R. Graze, Jr., “Development of a Miniatures, dilution-based diesel engine particulate sampling system for gravimetric measurement of particulates,” SAE Technical Paper 931190, April, 1993.
- [7] R. R. Graze, Jr., and J. G. Olin, “Development and test of a fractional sampling system for diesel engine particulate measurement,” ISA Chicago Technical Conference, Sep., 1993.
- [8] L. S. Abdul-Khalek, D. B. Kittleson, B. R. Graskow, and Q. Wei, “Diesel exhaust particle size: measurement issues and trends,” SAE Journal 980525, pp. 133-145, 1995.
- [9] Mott Corporation, product manual.

## 저 자 소 개



### 김성훈

1954년 9월생. 1977년 2월 연세대학교 기계공학과 졸업, 1979년 8월 연세대학교 기계공학과 졸업(공학석사), 1993년 5월 Texas A&M 대학교 기계공학과 졸업(공학박사), 1994년 3월~현재 계명대학교 기계자동차공학부 교수



### 이동렬

1963년생. 1986년 연세대학교 기계공학과 졸업. 1989년 Oklahoma state University 기계공학과 졸업(석사), 1995년 State University of New York at Stony Brook 기계공학과 졸업(박사), 1995년~1996년 State University of New York at Stony Brook. Thermal Science Research Laboratory. 1996년~1997년 삼성자동차(주) 기술연구소. 1997년~현재 대구가톨릭대학교 기계자동차공학부 교수