

Vane-type Static Mixer에 의한 디젤차량 배기관 내의 유동 특성에 관한 연구

강경남·김만영*

전북대학교 항공우주공학과

Numerical Study on the Flow Characteristics with a Vane-type Static Mixer in the Diesel Exhaust Systems

Kyoungnam Kang • Man Young Kim*

Department of Aerospace Engineering, Chonbuk National University, Jeonbuk 561-756, Korea

(Received 24 August 2011 / Revised 24 December 2011 / Accepted 7 January 2012)

Abstract : In this work the mixing and flow characteristics of a vane-type static mixer were investigated numerically for the reduction of NO_x in the SCR-system of the diesel engines. The mixer was located in the 57 times pipe diameter away from the inlet. The analysis were performed by changing such various parameters as vane shape, angles, blockage ratio and location of the vane. The flow structure through the mixer was characterized by uniformity index and pressure drop. The results show that uniformity index and pressure coefficient are substantially influenced by the vane shape, angle, blockage ratio and position of the vane of the mixer.

Key words : Static mixer(스테틱믹서), UI(Uniformity Index, 균일분포지수), Diesel engine(디젤엔진), Pressure drop(압력강하)

Nomenclature

UI : uniformity index
 BR : blockage ratio
 SN : swirl number
 C_p : pressure coefficient
 D : diameter of pipe
 Θ : vane angle with pipe of axial direction
 w : width of vane
 r : distance between the mixer and pipe center

Oxidation Catalyst), AOC(Ammonia Oxidation Catalyst), 그리고 DPF(Diesel Particulate Filter)와 같은 연소제어 및 배기가스 후처리장치가 혼합 설치되어 사용되고 있다.¹⁻³⁾ 특히, 질소산화물(NO_x) 제어 기술 중 연소 후 탈질(flue gas treatment)기술에 속하는 선택적 촉매 저감법(Selective Catalytic Reduction, SCR)은 촉매를 사용하여 질소산화물을 환원하는 대표적인 배연탈질 기술로서 대형 연소기가 있는 각종 플랜트에 서 다양한 방식으로 적용되고 있다.⁴⁾ 이러한 SCR 시스템의 성능에 영향을 미치는 인자는 촉매의 종류나 형태, 촉매량, 유입가스의 온도, 그리고 유속분포 등을 포함하는 많은 요소들이 있다. 특히, 질소산화물을 고체촉매와 반응시키기 위하여 SCR 시스템 상류 측에 환원제인 무수암모니아수 투입시의 유입 농도 분포 및 균일한 유입속도가 반응기에서의 NO_x 환원 효율을 결정하는 중요한 요소가 되고 있다.⁵⁾

1. 서론

세계 각국의 배기규제가 강화되고 있다. 이러한 규제에 대응하기 위하여 디젤엔진을 장착한 차량의 배기관 EGR(Exhaust Gas Recirculation), DOC(Diesel

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

SCR 시스템에서 우레아의 유입 농도 및 유입 속도의 분포는 인젝터(injector)의 위치 및 분사각도에 의존하는데, 특히, 배기관 내 유동 방향으로 분사된 요소는 배기관 내에서 균일하게 혼합되지 못하고 배기관 중심에 집중되는 경향이 있다.⁶⁾ 따라서 일반적으로 요소용 인젝터와 촉매사이에서 믹서를 설치하여 암모니아와 질소산화물의 혼합을 향상시킨다. 믹서는 암모니아 슬립을 방지하고 질소산화물 환원 효율을 상승시키는 등 SCR 장치의 성능에 큰 영향을 미치는 것으로 알려져 있다.⁷⁾

믹서에 대한 연구 동향을 살펴보면, Zhang et al.⁷⁾은 관내 벽면에 설치된 delta wing에서 발생하는 와류의 특성에 대한 연구를 수행하여 NH₃와 배기 가스의 혼합이 stright wing과 delta wing, 엘리먼트의 개수에 따라 혼합유동의 길이 및 균일혼합분포가 변한다는 결과를 확인하였다. 한편, Boisaubert et al.⁸⁾은 원형관 내 SCC(Semi-Circular Cylinder) 뒤에 spsitter plate를 설치하여 후류의 영향을 실험적으로 고찰하여 후류의 길이가 증가하고 너비가 감소되는 것을 관찰하였다. 또한 실험적으로 연구한 역유동(reverse flow)이 발생하는 영역은 bluff body의 뒤쪽에 속도가 수렴하는 영역과 일치한다고 발표하였다. 최근, Oesterle et al.^{9,10)}은 관(pipe)내에 믹서의 일정한 수의 엘리먼트가 설치된 SL mixer와 같은 특화된 믹서가 디젤엔진 SCR 시스템에서의 UI(Uniformity Index)와 압력강하에 미치는 영향에 대한 수치 해석 및 실험을 통하여 각각의 믹서에 대한 관내 혼합유동분포를 비교하였다. 한편, Zheng et al.¹¹⁾은 디젤엔진의 SCR 시스템에서의 Cone 믹서의 UI와 압력강하에 대한 수치해석 및 실험을 수행하여 혼합 성능이 향상된 2 stage-mixer와 butterfly mixer를 개발하였다. 하지만 이러한 믹서는 응용분야가 매우 다양하고 광범위함에도 불구하고, 믹서 설계에 있어 중요한 역할을 하는 혼합부 즉, 엘리먼트의 모양에 따른 체계적인 실험 연구나 수치연구는 매우 제한적으로 수행되고 있다.¹²⁾

본 연구에서는 원형 관내에서의 엘리먼트의 기하학적 형상에 따른 혼합유동특성에 대해 고찰하였다. 이를 위해 각각 정사각형, 정삼각형, 정오각형 그리고 정육각형으로 이루어진 베인(vane)을 모델

링하여 믹서의 유동특성을 나타내는 UI , SN (swirl number), 그리고 C_p 와 같은 성능계수에 미치는 영향을 확인하였다. 또한, 베인의 각, 크기 그리고 위치에 따른 믹서 후단에서의 유동특성을 고찰하였다.

2. 해석방법

2.1 해석모델

파이프 전면에서의 유동분포에 영향을 주는 여러 가지 변수 중 믹서의 형상에 따른 유동현상의 변화를 살펴보기 위하여 입구부, 믹서, 그리고 출구부로 구성된 해석 격자를 생성하였다. 모든 해석 수행 시 격자 조밀도를 동일하게 하여 격자로 인한 영향을 최소화하였다.

Figs. 1과 2는 각각 SCR 시스템의 개념도와 설계

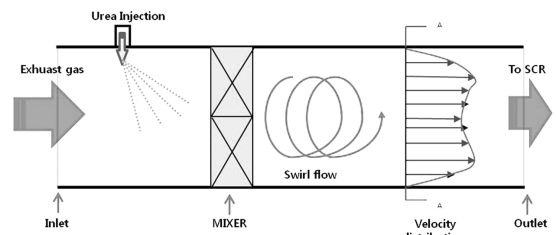


Fig. 1 Schematic of the urea-SCR injection system with mixer

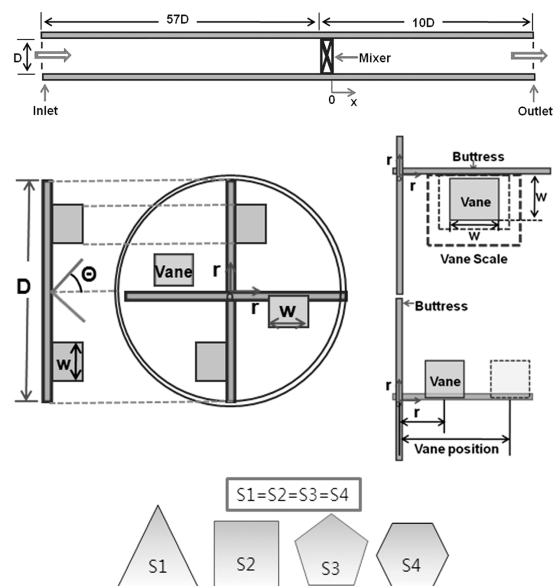


Fig. 2 Schematics of the design parameters such as pipe (upper), mixer (middle), and shape of the vane (lower)

Table 1 Design parameters of the vane adopted in the present static mixer

Case	Angle (°)	Scale (w/D)	Location (r/D)
1	0~90	0.16	0.17
2	45	0.08~0.24	0.17
3	45	0.16	0~0.30

기하학적 변수(즉, 파이프, 믹서, 그리고 베인의 형상)를 보여주고 있다. 직경이 D 이며, 믹서의 전단 및 후단으로의 길이가 각각 $57D$ 및 $10D$ 인 원형관에 베인의 모양, 길이, 관내 베인의 위치 그리고 베인각의 변화에 따른 유동특성에 대한 연구를 수행되었다. 베인에 대한 상세한 정보는 사각형 베인을 기준으로 Table 1에 표시하였다.

2.2 지배방정식 및 경계조건

믹서 내부 유동의 변화에 따른 혼합과정을 해석하기 위하여 아래와 같은 질량보존식과 운동량 보존식을 이용하였다.¹³⁾ 즉,

$$\frac{\partial u_j}{\partial x_j} = 0 \tag{1}$$

$$\rho \frac{\partial}{\partial x_j} (u_j u_i - \tau_{ij}) = -\frac{\partial P}{\partial x_i} + S_i \tag{2}$$

여기에서 τ_{ij} 는 Stoke's 법칙을 이용한 속도 구배 (gradient)에 의하여 아래의 식 (3)과 같이 표현되는 전단응력이다. 즉,

$$\tau_{ij} = -\mu \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) + \frac{2}{3} \mu \frac{\partial u_k}{\partial x_k} \delta_{ij} \tag{3}$$

이와함께 $k-\epsilon$ 모델을 적용하여 난류를 해석하였다. 한편, 작동유체인 공기의 밀도는 1.225 kg/m^3 , 점성계수는 $1.7894 \times 10^{-5} \text{ Ns/m}$ 로 설정하였다. 배기관 내 유체의 유동은 압축성 정상유동으로 가정하였고, 입구조건을 $Re=223,600$ 으로 설정하여 계산을 수행하였다.

2.3 성능지수

관 단면의 축방향(axial) 및 반경방향 속도(tangential velocity) 분포는 서로 다른 유체의 혼합을 분

석하는데 있어서 중요한 종속변수로서, 본 연구에서는 이를 이용하여 혼합성능지수인 UI 를 계산하였다. 속도의 균일정도를 측정하는 기준인 UI 는 다음 식 (4)과 같이 정의된다. 즉,

$$UI = 1 - \sum_{i=0}^n \frac{|u_i - \bar{u}|}{2\bar{u}S_i} S_i \tag{4}$$

여기에서 n 은 속도분포단면에 분포되는 총 셀의 수, S 는 속도분포단면의 단면적, S_i 는 셀 i 에서의 단면적, u_i 는 셀 i 에서의 속도, 그리고 \bar{u} 는 평균속도를 나타낸다. 한편, 원형관내의 유체선회 정도를 나타내는 SN 은 식 (5)와 같다. 즉,

$$SN = \frac{G_\psi}{G_x R} \tag{5}$$

여기에서 R 은 원형관의 반지름, G_x 와 G_ψ 는 각각 축 방향 유동과 각운동량으로서 아래의 식 (6) 및 (7)과 같이 표현할 수 있다.

$$G_x = 2\pi\rho \int_0^\infty (u^2 + \bar{u}^2) r dr \tag{6}$$

$$G_\psi = 2\pi\rho \int_0^\infty (uw + \bar{u}\bar{w}') r^2 dr \tag{7}$$

입구와 출구의 압력강하를 확인하기 위하여 아래의 식 (8)로 정의되는 압력계수 C_p 를 사용하였다. 즉,

$$C_p = \frac{P_{out} - P_{in}}{2\rho v_0^2} \tag{8}$$

3. 결과 및 토의

3.1 Mixer 후류 유동장

Fig. 3은 원형관내 설치된 믹서 후단에 형성되는 혼합 유동장의 특성을 파악하기 위해 베인각($\theta=45^\circ$, $BR(\text{blockage ratio})=0.118$ 그리고 정육각형 베인 위치($r/D=0.25$)일 때 믹서후단에 형성되는 유동장의 축방향 및 접선속도의 등속도분포를 보여주고 있다. 믹서에서 배기관 출구방향의 길이(z)를 z/D 로 무차원화하였다. 축방향 속도분포는 회전유동에 의해 원형관 벽면 근처에서 높은 속도분포를 나타내고 있으며 축방향 거리가 증가함에 따라 이러한 영향

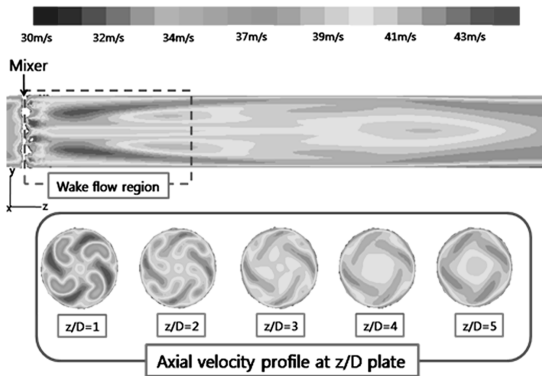


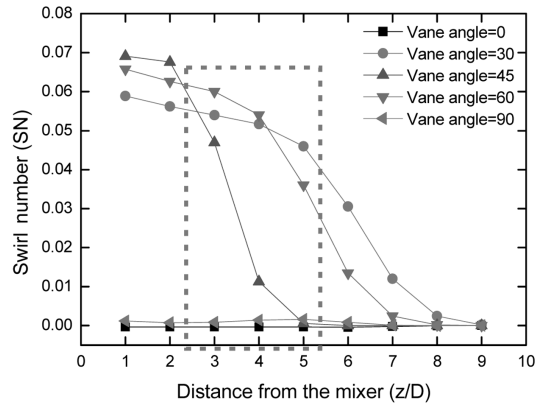
Fig. 3 Flow characteristics around the mixer and iso-velocity contours at 5 different axial locations

이 점차 사라져 감을 알 수 있다. Fig. 3의 믹서후단의 각 단면에서의 축방향 단면 속도를 보여주고 있다. 한편, 접선속도분포는 믹서에 설치된 베인 형상 및 개수에 영향을 받아 국부적으로 높은 속도분포가 나타나는 선회유동특성을 나타내고 있다. 특히 $z/D < 1$ 인 영역에서는 믹서에 설치된 베인 크기의 영향을 받아 믹서 후단에 강한 후류(wake flow)가 형성되고 있음을 알 수 있다.

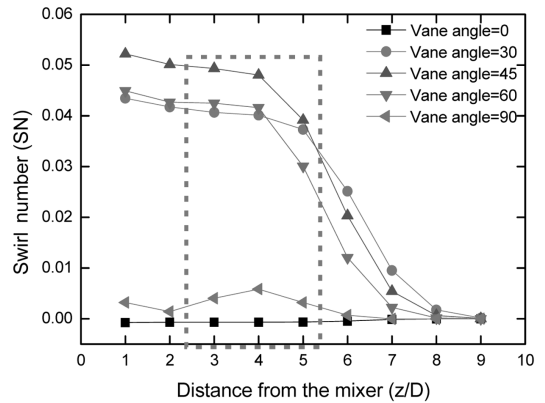
한편, Fig. 4는 Fig. 3의 계산조건을 적용한 베인의 모양에 따른 유동장의 SN (swirl number) 분포이다. 그림에서 알 수 있듯이 SN 분포는 $z/D=5\sim 6$ 이후에서 급격히 감소하는 경향을 나타내고 있으며, $z/D=7$ 이후에서는 선회유동특성이 사라져 감을 알 수 있다. 또한, 베인의 형태가 삼각형일 경우에 선회비가 높은 것을 확인할 수 있다. 이는 베인이 원형관내 단면에 차지하는 면적이 같은 베인에서 다른 도형들에 비해 상대적으로 긴 삼각형의 변의 길이와 관련이 있다고 사료된다. 여기에서, Figs. 3과 4의 결과로부터 믹서에 설치된 베인의 형상변화에 의한 영향을 잘 나타내는 축 방향 위치는 $z/D=3$ 인 영역이라고 판단된다. 이러한 해석 결과는 Boisaubert et al.⁸⁾이 실험적으로 연구한 재순환유동이 발생하는 영역과 bluff body의 뒤쪽에 속도가 수렴하는 구간이 일치하는 것과 유사함을 알 수 있다.

3.2 베인 각(θ)에 따른 유동특성

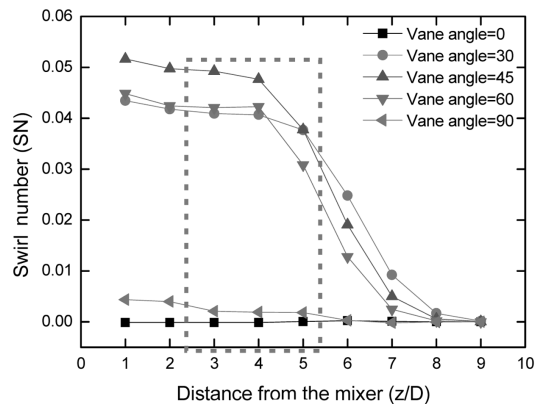
Fig. 5는 정사각형 베인을 기준으로 $w/D=0.16$ 및 $r/D=0.25$ 에서 베인 각 변화에 따른 UI , SN , 그



(a)



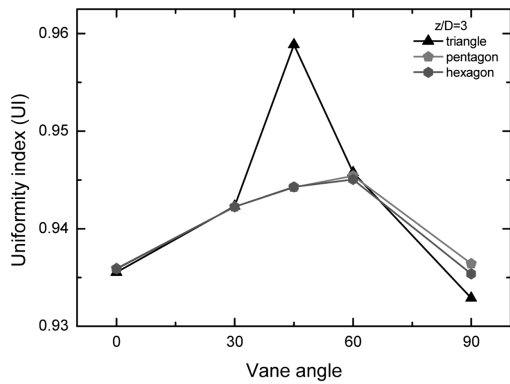
(b)



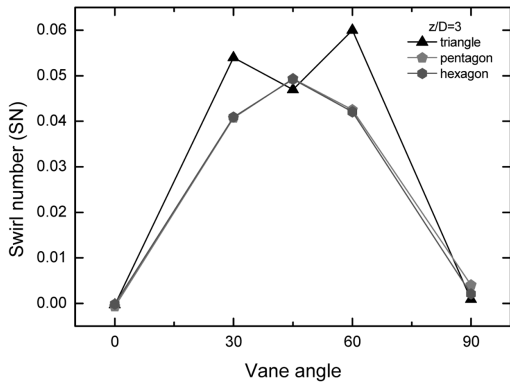
(c)

Fig. 4 Swirl number with vane shape, (a) triangle vane, (b) pentagon vane, (c) hexagon vane

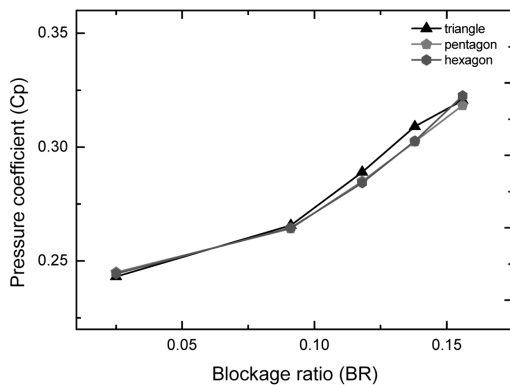
리고 C_p 를 믹서로부터 $z/D=3$ 인 지점에 대하여 나타낸 것이다. Fig. 5(a)에 나타낸 UI 를 살펴보면 베인각이 증가함에 따라 UI 는 증가하다가 $\theta=30\sim 60^\circ$



(a)



(b)



(c)

Fig. 5 Flow characteristics with vane angles, (a) UI , (b) SN , and (c) C_p

사이에서 가장 높은 값을 나타낸 후 점차 감소하는 경향을 보여주고 있음을 알 수 있다. 특히, 삼각형 베인의 경우는 $\theta=45^\circ$ 에서 가장 높은 UI 를 가지고 있음을 확인할 수 있다. Fig. 5(b)에서 알 수 있듯이

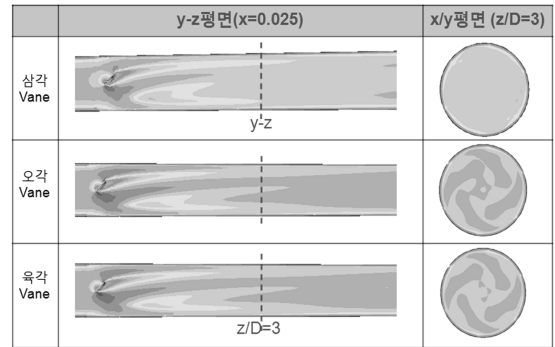
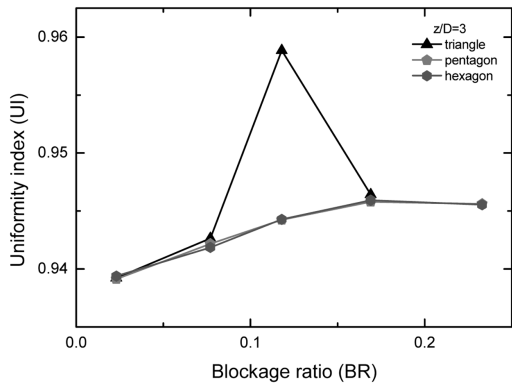


Fig. 6 Axial velocity profile in the pipe of $y=0$ and $z/D=3$

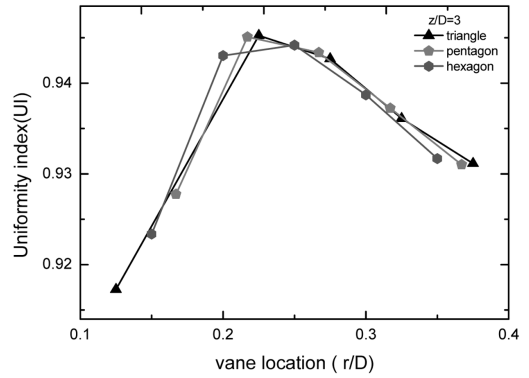
정오각형으로 이루어진 베인과 육각형으로 이루어진 베인은 45° 에서 최댓값을 갖는다. 한편, 정삼각형의 베인의 경우 베인 각이 30° 와 60° 사이인 지점에서 SN 이 감소하는 것을 확인할 수 있다. Fig. 5(c)는 베인 각에 따른 축 단면에 차지하는 믹서의 넓이를 축 단면으로 나누어준 BR 값을 계산하여 이에 따른 C_p 값을 나타낸 것이다. BR 은 베인 각도에 따라 결정되는 유동단면의 투영 면적을 이용하여 계산되었으며 $\theta=0^\circ, 30^\circ, 45^\circ, 60^\circ$ 그리고 90° 는 각각 $BR=0.025, 0.091, 0.118, 0.138$ 그리고 0.156 에 해당된다. 이와 같이 베인 각 대신 BR 을 이용하여 나타낸 것은 믹서 전후의 압력손실이 베인 각보다 베인 각에 의해 결정되는 원형관 단면에서 베인이 차지하는 BR 값에 직접적인 연관성을 보이기 때문이다. C_p 의 변화를 살펴보면 베인의 모양과 관계없이 베인각도에 따른 BR 값이 증가함에 따라 C_p 가 증가하는 것을 확인할 수 있다. 한편, Fig. 6은 $y=0$ 인 단면과 $z/D=3$ 인 단면의 축 방향 속도 분포를 나타낸 것으로서, 삼각형 베인의 속도 분포의 균일도가 빠르게 이루어지는 것을 확인할 수 있다.

3.3 베인 크기(w/D)에 따른 유동특성

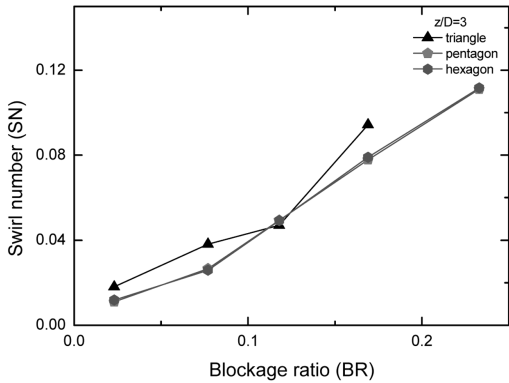
Fig. 7은 Fig. 5에서 살펴본 믹서의 베인의 각 변화에 따른 성능지수 고찰에서 비교적 양호한 UI 값을 나타내는 $\theta=45^\circ$ 를 적용하였을 때, 베인 크기 (w/D)의 변화에 따른 BR 에 의한 원형관 내 성능지수의 변화를 나타낸 것이다. Fig. 7(a)를 살펴보면 BR 값이 커질수록 UI 가 증가하는 경향을 나타내고 있음을 알 수 있다. 그러나 삼각형 베인의 경우



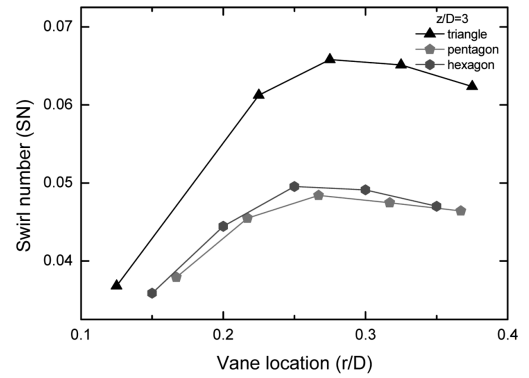
(a)



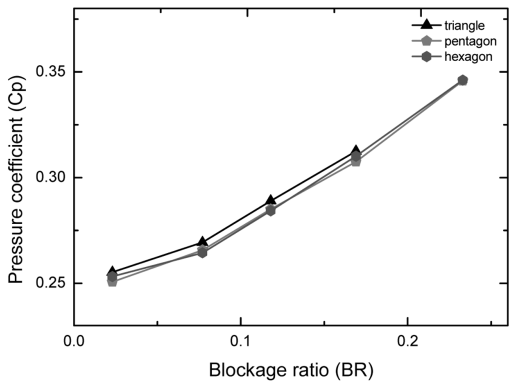
(a)



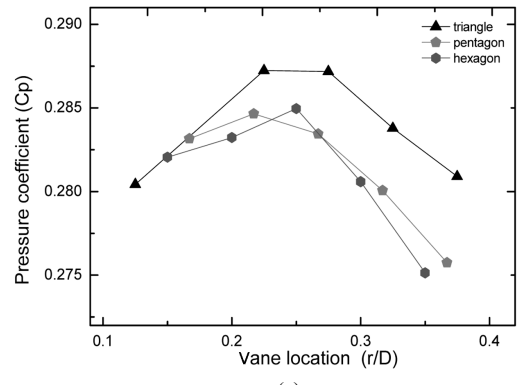
(b)



(b)



(c)



(c)

Fig. 7 Flow characteristics with vane scales, (a) UI , (b) SN , and (c) C_p

Fig. 8 Flow characteristics with vane locations, (a) UI , (b) SN , and (c) C_p

$BR = 0.118$ 일 경우에 상대적으로 높은 UI 값을 갖는다. 한편, Fig. 7(b)와 Fig. 7(c)에서는 BR 에 따른 SN 의 변화와 C_p 가 베인 크기가 증가함에 따라 선형적으로 증가하는 경향을 확인할 수 있다.

3.4 베인 위치(r/D)에 따른 유동특성

Fig. 8은 정사각형 베인을 기준으로 $w/D = 0.16$, 그리고 $\theta = 45^\circ$ 인 경우에 베인 위치를 원형관 중심으로부터 벽면으로 이동시켜가면서 원형관 내 성능

지수를 확인한 결과를 보여주고 있다. 이 때 베인의 위치는 Fig. 2에 나타난 것과 같이 원형관 중심에서 베인 중심까지 거리로 정의하였다. Fig. 8(a)에 나타난 UI 는 베인 위치가 원형관 중심에서 벽면 쪽으로 이동할수록 증가하다가 $r/D=0.25$ 에서 최대값을 나타낸 후 점차 감소하는 경향을 보여주고 있다. Fig. 8(b)은 베인이 관 단면의 중심에서 벽면으로 가까워질수록 SN 이 증가하다가 r/D 가 0.25에서 감소하는 경향을 확인할 수 있다. 한편, Fig. 8(c)의 베인 모양에 따른 믹서 전후의 압력손실 정도를 나타내는 C_p 값은 믹서의 위치가 변화에 따라 변화하며, 삼각형 베인의 경우 다른 모양의 베인들보다 상대적으로 높은 C_p 값을 갖는다.

4. 결론

본 연구에서는 원형관 내의 믹서의 기하학적 변수에 따른 혼합유동특성을 고찰하기 위하여 베인의 각, 크기 및 위치 그리고 베인 모양의 변화에 따른 성능지수에 관한 수치 연구를 수행하였으며, 그 결과를 아래와 같이 정리하였다.

- 1) 베인 형상변화에 따른 선회 유동특성은 $z/D=3$ 범위에서 잘 나타내며 $\theta=45^\circ$ 일 경우에 상대적으로 높은 UI 를 갖는다.
- 2) 베인 크기(w/D)가 커질수록 UI 가 커지는 경향을 나타내며, 삼각형 베인의 경우 $w/D=0.12$ 일 때 가장 높은 UI 를 얻을 수 있다.
- 3) 완전히 발달된 속도분포를 갖는 유동이 믹서에 유입될 경우, 베인이 $r/D=0.2 \sim 0.25$ 에 위치할 때 비교적 양호한 UI 및 C_p 를 나타낸다.
- 4) C_p 는 BR 에 따라 변화하는 것을 확인할 수 있으나, 베인의 위치에 따라서 BR 보다 베인의 모양에 더 크게 영향을 받는다.

References

- 1) J. Kim, K. Lee, K. Oh, D. Kim, C. Lee and C. Lee, "The Experimental Study on the Emission Characteristics of Particulate Matter of Un-cracked Filter and Cracked Filter," Spring Conference Proceedings, KSAE, pp.502-508, 2010.

- 2) J. H. Kim, M. Y. Kim and H. G. Kim, "NO₂-assisted Soot Regeneration Behavior in a Diesel Particulate Filter with Heavy-duty Diesel Exhaust Gases," Numerical Heat Transfer, Part A (Applications), Vol.58, No.9, pp.725-739, 2010.
- 3) B. Yun, C. Kim, M. Y. Kim, G. Cho, H. Kim and Y. Jeong, "Numerical Modeling of Vanadia-based Commercial Urea-SCR Plus DOC Systems for Heavy-duty Diesel Exhaust Aftertreatment Systems," Transactions of KSAE, Vol.18, No.2, pp.24-30, 2010.
- 4) Y. B. Park and C. M. Jang, "Optimization for Flow Uniformity on the Selective Catalytic Reduction SCR System of a Steam Supply Boiler," Summer Conference Proceedings, SAREK, pp.416-420, 2009.
- 5) C. K. Ryu, K. B. Shim and S. M. Choi, "Flow Optimization Study of Selective Catalytic Reactor by Reduced Scale Model Experiments and Numerical Simulations," Transactions of KSME(B), Vol.23, No.4, pp.548-555, 1999.
- 6) S. J. Jeong, C. H. Lee, W. S. Kim and C. H. Lee, "The Effect of Ammonia and Flow Distribution on DeNO_x Performace of Urea-SCR Catalyst in a Heavy Duty Diesel Engine," Transactions of KSAE, Vol.7, No.1, pp.229-235, 2007.
- 7) X. Zhang and M. Romzek, "3D Numerical Study of Mixing Characteristics of NH₃ in front of SCR," SAE 2006-01-3444, 2006.
- 8) N. Boisubert and A. Texier, "Effect of a Splitter Plate on the Near-wake Development of a Semi-circular Cylinder," Experimental Thermal and Fluid Science, Vol.16, Nos.1-2, pp.101-111, 1998.
- 9) J. J. Oesterle, S. Calvo, B. Damsom, G. Geyl, F. Neumann and J. Rudelt, "Urea Systems in Focus-New Challenges and Solutions in the Development of Car and Commercial Vehicle Exhaust Systems," SAE 2008-01-1186, 2008.
- 10) J. J. Oesterle, S. Calvo, B. Damsom, G. Geyl, F. Neumann and J. Rudelt, "SCR Technology with Focus to Stringent Emissions Legislation," SAE 2008-01-2640, 2008.
- 11) G. Zheng, G. Palmer, G. Salanta and A. Kotrba, "Mixer Development for Urea SCR Appli-

- cations,” SAE 2009-01-2879, 2009.
- 12) K. Kang, M. Y. Kim and J. Lee, “Numerical Study of the Mixing Flow Characteristics of Vane-type Static Mixer with Geometric Parameter for Optimum Design,” Autumn Conference Proceedings, KSME, pp.3128-3133, 2010.
- 13) C. Kim, N. S. Park and M. Y. Kim, “Numerical Investigation of the Flow and Mixing Characteristics with the Static Mixer in a Catalytic Combustor for the MCFC Power Plant System,” Transactions of KSME(B), Vol.33, No.3, pp.149-155, 2009.