

# SCR 시스템의 믹서 구조 특성에 따른 유동 혼합 특성에 관한 연구

서진원<sup>1)</sup> · 이규익<sup>1)</sup> · 오정택<sup>1)</sup> · 최윤호<sup>\*1)</sup> · 이종화<sup>2)</sup> · 박진일<sup>2)</sup>

아주대학교 기계공학과 대학원<sup>1)</sup> · 아주대학교 기계공학부<sup>2)</sup>

## The Study on the Effects of Mixer Configurations on Fluid Mixing Characteristics in SCR Systems

Jin-Won Seo<sup>1)</sup> · Kyu-Ik Lee<sup>1)</sup> · Jeong-Taek Oh<sup>1)</sup> · Yun-Ho Choi<sup>\*1)</sup> · Jong-Hwa Lee<sup>2)</sup> · Jin-Il Park<sup>2)</sup>

<sup>1)</sup>Department of Mechanical Engineering, Graduate School, Ajou University, Gyeonggi 443-749, Korea

<sup>2)</sup>Department of Mechanical Engineering, Ajou University, Gyeonggi 443-749, Korea

(Received 9 June 2008 / Accepted 14 August 2008)

**Abstract** : The key issues for the reduction technologies of the exhaust gas from diesel engine being developed are to reduce particulate matters and NOx. The SCR system is known to be one of the most efficient and stable technologies to remove NOx through the mixing of NOx and urea solution. In the present research, the effects of mixer configurations of SCR system have been investigated to enhance the SCR performance. First, a Schlieren technique is employed to visualize the mixing characteristics of urea solution and exhaust gas. The results show that a mixer is essential to obtain proper fluid mixing. In addition, numerical studies have been made to understand the mixing characteristics through the comparison of the mal-distribution index of concentration at the several locations of the diffuser. In particular, the effects of number of blade and mixer angles on mixing characteristics were studied. The results show that the blade angle has a larger effect on the mixing characteristics than the number of blades.

**Key words** : Selective catalytic reduction(선택적촉매환원), NOx(질소산화물), Mixer(믹서), Schlieren technique(Schlieren 가시화법), Sauter mean diameter(Sauter 평균거리), Spray model(분무모델), CFD(전산유체역학)

### 1. 서론

최근 개발되고 있는 디젤 엔진의 배기 가스 저감 기술의 핵심은 질소산화물(NOx)과 입자상물질(PM)을 줄이는데 있다. 이중 입자상물질은 DPF(Diesel Particulate Filter trap) 기술의 발달로 약 90% 까지 저감하는 수준에 도달했다. 반면 질소산화물에 대해서는 LNT(Lean NOx Traps), LNC(Lean NOx Catalysts) 및 SCR(Selected Catalytic Reduction)과 같은 저감 기술이 제시되고 있으며, 최근 들어 SCR이 가장 유력한 기술로 주목받고 있다. SCR 시스템은

배기가스에 요소(urea-water-solution)를 분사해 질소산화물을 정화하는 장치이다.<sup>1)</sup>

요소는 보통 32.5%의 농도를 가지고 물과 혼합하여 수용액 형태로 이용되며, 이는 인젝터를 통해 분사되고 이때 높은 배출가스의 온도로 인해 열분해되어 암모니아로 변화되고, 생성된 암모니아는 후단에 장착된 SCR 촉매에서 질소산화물과 반응하여 물과 질소로 분해된다. 이는 유해가스 성분이 무해가스 성분으로 정화되는 과정이다. 이 시스템을 이용하면 질소산화물 저감율이 약 90% 이상으로 알려져 있어 상당히 효율적이다.<sup>2)</sup>

그러나 배기관내 유동 방향으로 분사된 요소는

\*Corresponding author, E-mail: ychoi@ajou.ac.kr

배기관 내에서 혼합되지 못하고 배기관 중심에 집중되는 경향이 있다.<sup>3)</sup> 따라서 일반적으로 요소용 인젝터와 촉매 사이에 믹서를 설치하여 암모니아와 질소산화물의 혼합을 촉진시킨다. 믹서와 확대관은 암모니아의 슬립을 방지하고 질소산화물 환원 효율을 상승시키는 등 혼합에 큰 영향을 끼친다.

본 연구는 SCR 시스템의 믹서에 의한 혼합 특성을 실험과 수치해석을 통해 분석하였다. 먼저 실차 상태의 배기관을 모사한 실험리그를 제작하고 Schlieren 가시화법을 이용하여 믹서 설치 유무에 따른 배기가스의 유동 혼합 현상을 가시화하였다.<sup>11)</sup> 또한 상용코드인 FLUENT를 이용하여 실험으로 수행하기 어려운 믹서의 각도 및 개수를 변화시켜 유동 혼합 특성을 예측하였다.

## 2. 연구 방법

### 2.1 실험 장치 및 실험 방법

실험은 요소 및 배기 유동의 혼합 상태의 가시화를 용이하게 하고, 혼합에 영향을 끼치는 인자들의 특성을 확인하기 위해 디젤 차량의 배기관을 모사한 리그 장치를 구성하여 시행하였다.

#### 2.1.1 SCR 시스템 리그 장치

엔진에서 나오는 배기가스를 구현하기 위해 공기 송풍기와 히터를 이용하였다. 모사 배기관 내 공기의 유량은 송풍기에 부착된 공기 유량 측정기를 이용하여 조절하고, 히터를 이용하여 공기 유동이 배기가스와 같은 온도가 되도록 하였다. 인젝터는 배기관과 일정한 각도로 부착되어 요소를 분사한다. 이때 압력은 질소가스로, 유량은 duty를 제어하여 조절하였다. 확대관 이후에 촉매장치를 모사한 덕트를 부착하였다.

분사된 요소가 모사 배기관 내에서 잘 혼합되도록 믹서를 설치하였다. 믹서를 설치하면 배압이 상승하여 엔진의 출력을 저하시키지만, 질소산화물, 암모니아 및 이소시아닉 산(HNCO) 그리고 미세먼지와 산소가 배기관 내에서 고르게 혼합하여 질소산화물의 환원효율을 증가시키도록 도와준다.

리그장치의 배기관은 효과적인 가시화를 위해 직관으로 제작하였고, 모사 배기관을 통과하는 광원의 굴절을 없애기 위해 단면을 원형이 아닌 사각형

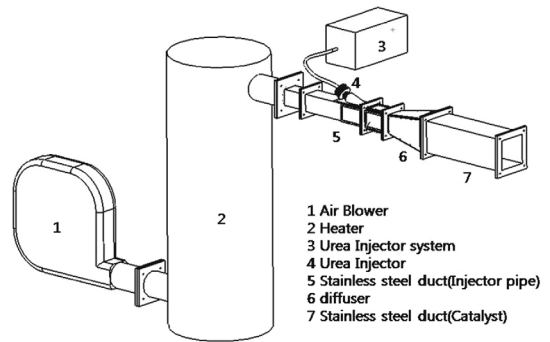


Fig. 1 A schematic of the urea mixing visualization system

으로 제작하였다. 그러나 모사 배기관의 길이와 단면적의 넓이는 실차와 같도록 제작하였다. Fig. 1은 가시화 실험을 위해 제작한 전체 장치이다.

#### 2.1.2 Schlieren 법을 이용한 가시화

Schlieren 가시화법은 배기관 각 부분에서 공기 유동의 혼합 특성과 요소 증발기체의 거동을 가시화하기 위해 이용하였다. 이 방법은 매질의 밀도 차에 의해 굴절률이 변화하는 부분이 있을 때 빛의 진행 방향의 변화를 이용하여 육안 또는 사진 촬영으로 그 모양을 관찰하는 방법이다.

2개의 오목거울과 광원, 고속카메라, knife edge로 구성된 off-axis Z-type double-mirror type<sup>4)</sup>으로 구성하였다. 광원은 Moritex사의 250W 메탈 할라이드 램프를 이용하였고, 초당 10,000 프레임 이상 촬영이 가능한 고속카메라를 이용하였다. 주요 실험 조건인 공기 유동의 온도와 유량 그리고 요소 분사량

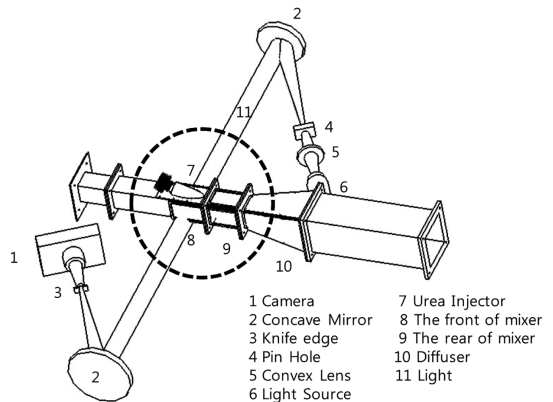


Fig. 2 A schematic of the injection visualization system using schlieren

은 prototype 디젤 차량이 FTP-75 mode 주행 시의 평균량(공기온도 = 673K, 유량 = 100kg/h, 요소 분사량 = 0.000875 kg/s)을 기준으로 실시하였다. 또한 모사 배기관에 들어오는 공기 유동의 와류를 줄이기 위해 모사 배기관 입구에 격자와 허니컴을 삽입하고, SCR 촉매 및 머플러에 의한 배압을 고려하여 실험하였다.

## 2.2 수치해석 방법

### 2.2.1 수치 해석 모델

본 연구에서는 3차원 SCR 시스템에서의 유동현상을 해석하기 위하여 상용코드인 FLUENT<sup>5)</sup>를 이용하였다. 수치기법은 유한체적법을 이용하고, 정상상태 압축성 난류유동으로 가정하였으며, 이에 따라 지배방정식은 압축성 유동의 연속방정식, 모멘텀 방정식, 에너지 방정식, 난류 운동방정식 등을 고려하였다. 난류 모델은 k-ε 모델을 이용하였다.

분무 유동을 구현하기 위해 분무 모델<sup>5,6)</sup>의 discrete phase 모델을 이용하고, 분무된 요소가 믹서와 배기관 벽면에 액적상태로 충돌하였을 경우, 서로의 상호작용을 정확히 예측하기 위해 벽막(wall film) 모델을 이용하였다. 이 모델은 배기가스와 요소의 혼합성을 구현하는데 중요한 역할을 한다. SCR 시스템의 촉매는 다공성 물질로 되어있다. 이를 위해 포러스 모델을 이용하여 실제 다공성 매질의 투과율 및 관성저항 인자와 같은 특성 값을 갖는 영역으로 가정하여 해석하였다.

### 2.2.2 계산영역 및 경계조건

SCR 시스템의 3차원 기하학적 형상은 Fig. 3과 같다. 계산영역은 실험과 동일한 SCR 시스템 영역으로 선정하였다. 계산에 이용된 경계조건은 Table 1에 기술하였다.

Table 2에는 시뮬레이션에서 사용한 초기 분사 조건을 기술하였다. 이는 실험에서 이용되고 있는 분무 사양을 적용하였고, 분무물질은 물을 이용하였다. 실제 차량에서는 요소를 이용하는데, 계산에서 요소의 물성값을 정확히 구현하기 어렵고, 요소는 약 70% 정도의 수용액 상태로 분사되기 때문에 물로 이것을 대신하였다. 또한 믹서와 유체의 유로의 벽면에는 단열조건과 점착조건을 설정하였다.

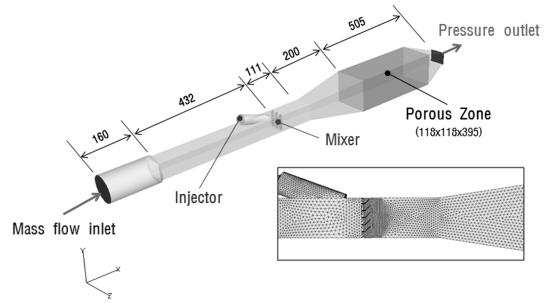


Fig. 3 Computational domain and computational grid for SCR system

Table 1 Boundary conditions

위치	조건	설정값
Inlet	Mass flow inlet	100 kg/h, 673K
Outlet	Pressure outlet	1 bar (대기압)
Catalyst	Porous media	$\alpha=2.805 \times 10^{-7}$ $C2=79.98$
Wall	Adiabatic / wall film	-

Table 2 Spray Conditions

초기 조건	설정값
Injection type	Solid cone type
Injection velocity	25m/s
Injection temperature (water)	300 K
Cone angle	12 °
SMD	90 μm
Spray material	Water

SCR 내부의 복잡한 형상을 모사하기 위하여 비정렬격자계를 이용하였으며, 인젝터와 믹서 부근의 격자를 Fig. 3에 도시하였다. 믹서의 형상 변화에 따른 혼합특성을 알아보기 위해 믹서 날개의 각도 및 수에 따라서 다양한 계산을 수행하였다. 각 계산마다 사용한 격자수는 약 410,000개~ 620,000개이다.

## 3. 결과

### 3.1 실험 결과

#### 3.1.1 믹서가 없는 경우의 유동 특성

공기 송풍기와 히터를 이용하여 배기관 내 고온의 공기유동을 만든 후 정상상태에서 믹서를 부착하지 않고 요소를 분사하였다.

Fig. 4는 분사된 요소가 모사 배기관 내에서 분사

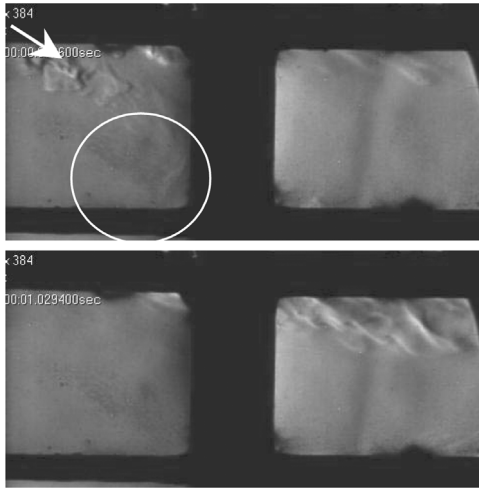


Fig. 4 Schlieren images without mixer when urea-solution is injected in the duct

후 증발되어 이동하는 것을 일정 시간 단위로 나타낸 것이다. 유동은 좌측에서 우측방향으로 진행하고, 가시화 위치는 Fig. 2에 표시된 부분이다. Fig. 4에 나타난 화살표 방향으로 요소가 분사된 후, 일부는 증발되어 공기 유동을 따라 이동하고, 일부는 원으로 표시된 벽면의 표면을 적시게 된다. 벽면이 약 130°C 이상일 때, 적시진 요소는 용융되어 배기관 아랫부분에서 이동하고, 130°C 이하에서는 배기관 벽면에 결정화된다.

### 3.1.2 믹서가 있는 경우의 유동 특성

Fig. 5는 믹서를 설치한 배기관으로서 격자무늬는 믹서의 설치 위치를 나타낸다. 믹서의 날개는 상, 하로 되어있어 이를 지나는 유동은 믹서의 날개 방향을 따라 흐르고, 날개를 지난 유동은 상, 하 방향으로 복잡하게 혼합되어 와류를 발생시킨다. 이에 화살표를 따라 분사된 요소가 증발기체 및 벽류를 형성한 후 모사배기관 내에서 와류를 따라 이동한다. 이 경우 믹서를 지난 후 증발기체는 믹서가 없는 경우보다, 강하게 혼합되는 것을 볼 수 있다.

## 3.2 수치해석 결과

### 3.2.1 수치 모델의 검증

#### 가. 분무 모델 검증

본 연구에서 이용된 코드의 신뢰성을 확보하기

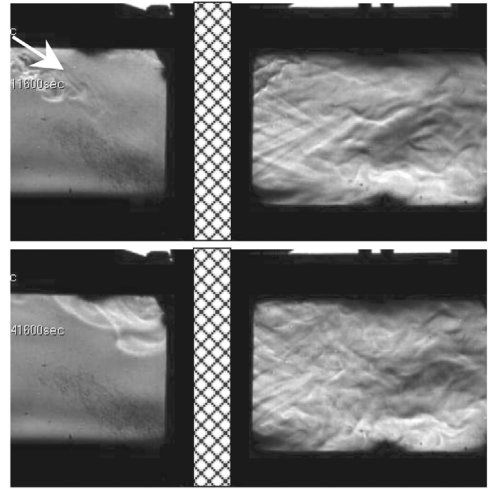


Fig. 5 Schlieren images with mixer when urea-solution is injected in the duct

위해 분사 특성을 나타내는 Sauter Mean Diameter (SMD)와 분사도달거리를 비교하였다. SMD는 식 (1)과 같이 정의된다. 이 식은 분사된 액체가 주위 기체와 표면을 통해 접촉하기 위하여 얼마나 잘 미립화 되었는가를 보여주는 유용한 척도이다.

$$D_{32} = \frac{\sum_i d_v^3}{\sum_i d_s^2} \quad (1)$$

여기서  $d_v$ 는 액적의 체적 지름,  $d_s$ 는 면적 지름을 나타낸다.

분무 모델의 SMD 검증을 위하여 500×500×1000(mm) 크기의 사각류에 물을 분사하여, SMD를 측정된 결과 실험값과 계산값의 오차는 약 1% 미만으로 서로 잘 일치하였다.

분사도달거리(spray tip penetration)는 분사특성을 나타내는 또 하나의 중요한 척도로 분사된 액적이 시간이 지남에 따라 도달하는 거리를 나타낸 값이다. Fig. 6은 시간에 따른 분사도달거리에 대한 실험값과 계산값을 비교하고 있다. SMD와 마찬가지로 전체적으로 계산값과 실험값이 거의 일치하는 것을 볼 수 있다. 이처럼 분사특성을 나타내는 두가지 값에 대한 검증을 통하여 분무 모델에 대한 신뢰성을 확인하였다.

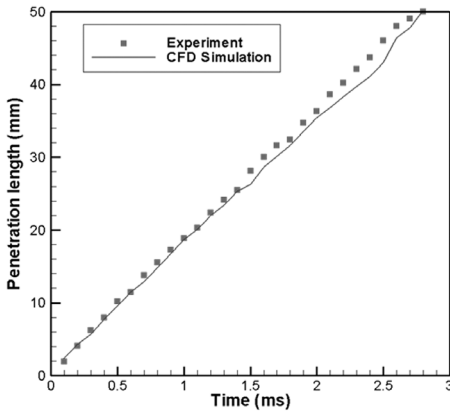


Fig. 6 Comparison of experimental and numerical results for spray penetration length

**나. 포러스 모델 검증**

SCR 시스템의 촉매를 포러스 구조로 가정하여 계산하였다. Fig. 7은 실험과 수치계산을 통해 구한 촉매(porous zone) 전·후의 압력 차이를 비교하고 있다. 전체적으로 잘 일치하고 있는 것을 볼 수 있다. 속도의 증가에 따라 약 5~10% 차이를 보이고 있지만, 이는 실험에서 유속이 빨라지면 흐르는 공기가 누설되어 차이가 발생한 것으로 파악된다.

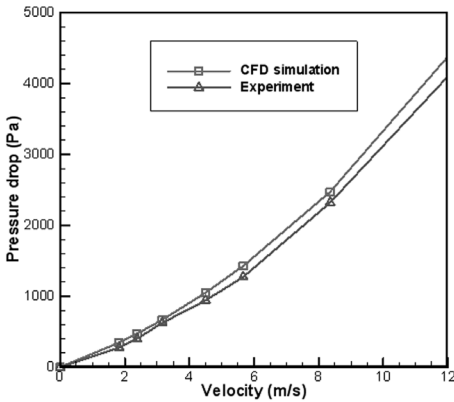
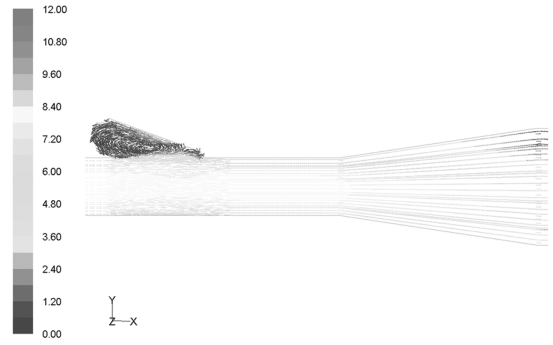


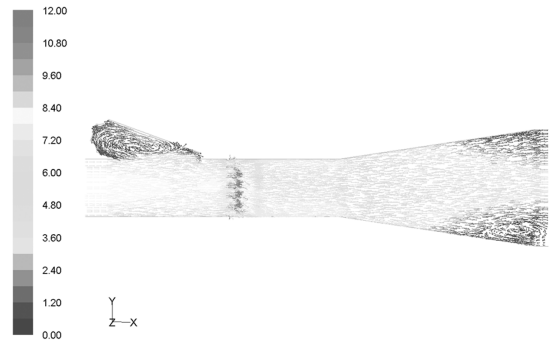
Fig. 7 Comparison of experimental and numerical results for pressure drop in porous zone

**3.2.2 믹서 설치 유무에 따른 유동**

Fig. 8에서는 배기관 내에서 믹서의 설치 유무에 따라 유동장의 변화를 비교하였다. 믹서가 없는 경우(Fig. 8(a))에는 배기관 전체를 통하여 유동이 매끄럽게 흘러 유동이 혼합되는 것을 볼 수 없지만, 믹서



(a)



(b)

Fig. 8 Velocity contour on the cross section at the center line (a) without mixer (b) with mixer

가 있는 경우(Fig. 8(b))에는 믹서 끝단에서 강한 유동 혼합이 발생하는 것을 볼 수 있다. 이들 결과는 Fig. 4와 5의 가시화 결과와 유사하다. 이를 바탕으로 믹서의 영향을 보다 더 자세히 알아보기 위해 믹서의 개수와 각도를 변화시켜 CFD 계산을 수행하였다.

**3.2.3 믹서 각도와 개수에 따른 유동 특성**

믹서 각도와 개수에 대한 영향을 알아보기 위해 Fig. 9의 Case 2-2를 기준으로 믹서의 각도와 개수를 총 9개의 경우로 나누어 계산을 수행하였다. 믹서의 일반적인 형태는 Fig. 9(a)에 나타내었고, 각각의 경우에 대한 정보는 Fig. 9(b)에 자세하게 나타내었다. 또한, 분무된 물과 고온 공기의 혼합도를 알아보기 위해 Fig. 10과 같이 세개의 단면을 잘라 각 단면에서의 농도 분포 불균일도<sup>7,8)</sup>를 측정하여 비교하였다.

Fig. 11에 보이는 것과 같이 모든 경우에 날개의

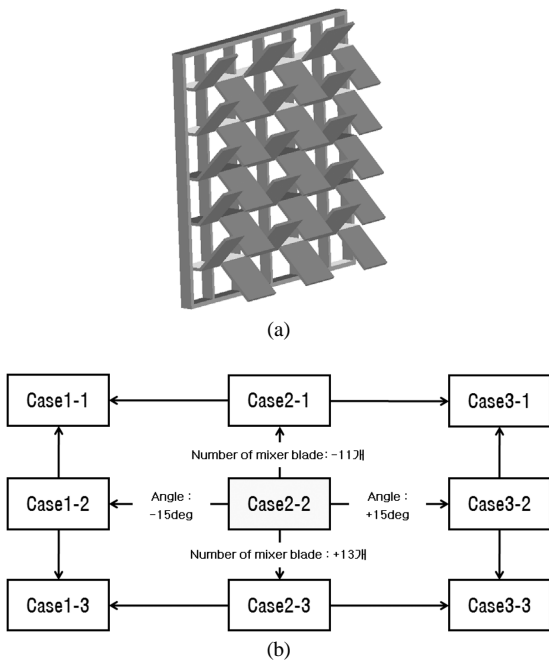


Fig. 9 (a) A typical configuration of a flow mixer (b) Various mixer angles and number of mixer blades used for the present calculations [Case 2-2 : angle 45°, number of blades 36.]

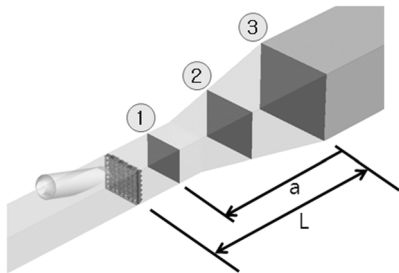


Fig. 10 The locations of the cross-sectional planes in diffuser for the measurement of the mal-distribution index

각도가 증가하면 물의 질량 분율이 고르게 퍼져 농도 분포 불균일도가 낮아지는 것을 볼 수 있다. 이와 같은 결과를 가지는 가장 큰 이유는 날개의 각도가 커질수록 난류 강도가 커지게 되고, 이에 따라 유동이 머무는 시간이 증가하여 주위 기체와 물이 혼합할 수 있는 시간이 늘어나기 때문이다.<sup>9,10)</sup>

Fig. 12는 믹서의 날개 개수에 따른 농도 분포의 불균일도를 나타내었다. 여기서 날개 개수가 가장 많은 경우에 농도 불균일도가 높게 나타났고, 다음

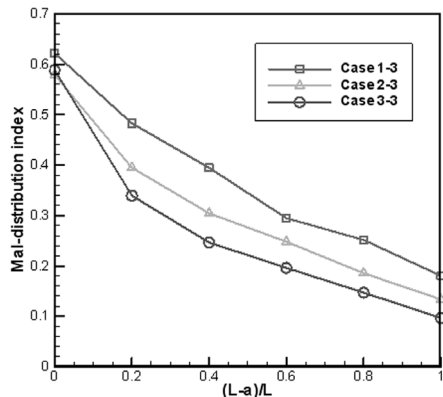
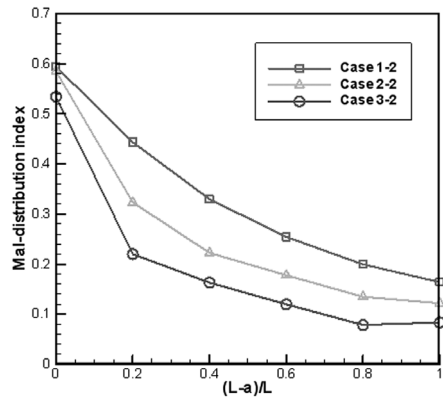
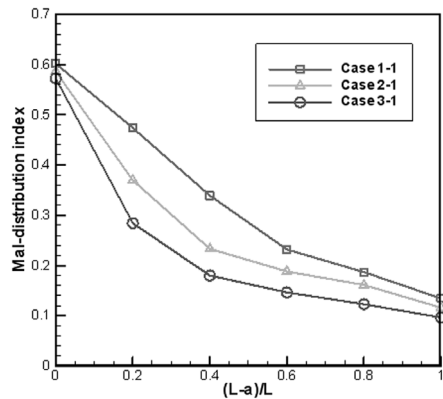


Fig. 11 Comparison of mal-distribution index of concentration at several cross-sectional planes in diffuser for various mixer blade angles

으로 날개 개수가 적은 경우가 그 뒤를 이었다. 끝으로 가장 낮은 농도 불균일도를 나타내는 것은 기준 경우(날개 각도 45°, 날개수 36개)이다. 하지만 날개 각도가 가장 작은 경우엔 위의 현상이 불규칙적으로 나타났다.

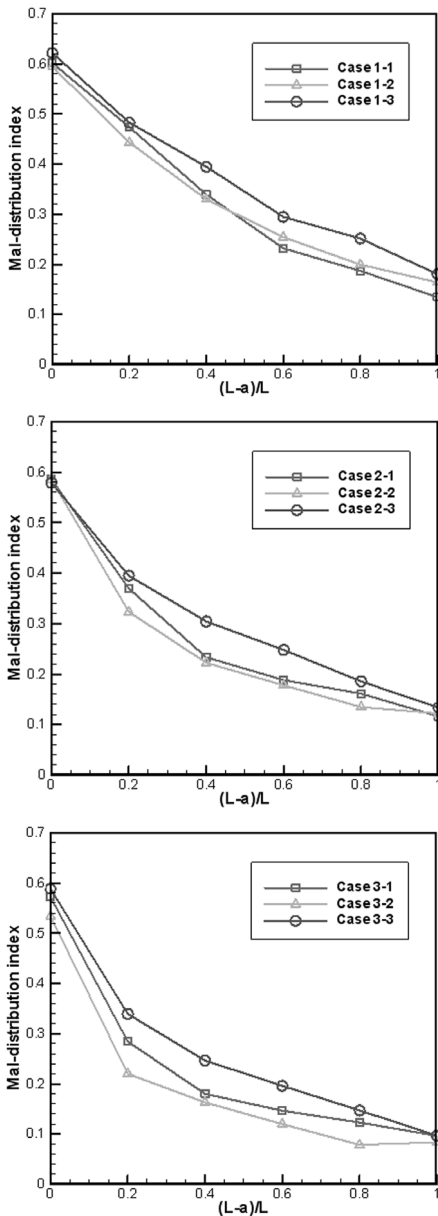


Fig. 12 Comparison of mal-distribution index of concentration at several cross-sectional planes in diffuser for various mixer blade numbers

#### 4. 결론

본 연구에서는 Schlieren 가시화법을 이용하여 믹서 설치 유무에 따른 혼합성을 가시화하고, 수치해석을 통해 믹서의 각도와 개수에 따른 혼합도를 구해 그 영향을 검토하였다. 본 연구 결과를 토대로 다

음과 같은 결론을 얻었다.

- 1) 요소는 믹서를 설치하지 않았을 경우, 증발기체는 공기유동의 혼합이 원활하지 않아 혼합도의 효과가 크지 않으나, 믹서를 부착한 경우, 믹서 끝단에서 발생하는 강한 와동에 의해 공기 유동의 혼합이 활발하여 분사된 요소의 혼합도가 커진다.
- 2) SCR 시스템의 해석을 위하여 FLUENT의 DPM 모델을 이용하여 분사에 대한 수치해석을 수행하였고, 분사특성을 나타내는 SMD 값과 분사 도달거리를 비교, 검증하여 시뮬레이션의 타당성을 증명하였다.
- 3) 믹서를 통과한 분사 유체의 혼합정도를 나타내는 농도 분포 불균일도를 이용하여 혼합특성을 파악하였다. 믹서의 날개 각도가 커질수록 농도 분포 불균일도가 낮아지는 것을 확인할 수 있었으며, 이는 날개 각도가 커질수록 난류강도가 증가하므로 혼합될 수 있는 시간이 증가하여 혼합특성이 좋아지기 때문으로 판단된다.
- 4) 믹서 날개 수에 대한 농도 분포 불균일도는 기준 경우(날개 각도 45°, 날개수 36개)가 가장 낮게 나타나는 것을 확인하였다. 그러나 혼합특성이 우수한 믹서 설계를 위해서는 날개수의 농도 분포 불균일도에 대한 영향은 미미하므로 적절한 날개 각도를 선정하는 것이 보다 중요하다.

#### 후 기

본 연구는 지식경제부와 한국산업기술재단의 전략기술인력양성사업으로 수행된 연구결과임.

#### References

- 1) T. V. Johnson, "Diesel Emission Control in Review," SAE 2006-01-0030, 2006.
- 2) H, P. Geering, C. H. Onder, M. Elsener and C. M. Schaer, "Control of a Urea SCR Catalytic Converter System for a Mobile Heavy Duty Diesel Engine," SAE 2003-01-0776, 2003.
- 3) S. J. Jeong, C. H. Lee, S. J. Lee, W. S. Kim and C. H. Lee, "The Effect of Ammonia and Flow Distribution on DeNox Performance of Urea-

- SCR Catalyst in a Heavy Duty Diesel Engine,” Spring Conference Proceedings, pp.229-235, 2007.
- 4) G. S. Settles, Schlieren and Shadowgraph Technique, Springer-Verlag, New York, 2001.
  - 5) FLUENT Users Guide, FLUENT Incorporated, 2006.
  - 6) P. J. O'Rourke, Collective Drop Effects on Vaporizing Liquid Sprays, Ph. D. Dissertation, Princeton University, Princeton, New Jersey, 1981.
  - 7) H. Weltens, H. Bressler, F. Terres, H. Neumaier and D. Rammoser, “Optimization of Catalytic Converter Gas Flow Distribution by CFD Distribution,” SAE 930780, 1993.
  - 8) S. J. Jeong, S. J. Lee, W. S. Kim and C. B. Lee, “Simulation on the Optimum Shape and Location of Urea Injector for Urea-SCR System of Heavy-Duty Diesel Engine to Prevent NH<sub>3</sub> Slip,” SAE 2005-01-3886, 2005.
  - 9) C. E. Lee and J. H. Kim, “The Effects of Turbulence Intensity on the Thermal NO<sub>x</sub> Formation of Diffusion Flames,” Spring Conference Proceedings, KSAE, pp.669-676, 1997.
  - 10) J.-W. Han, Y.-S. Jeong and C.-E. Lee, “The Effect of Turbulence Intensity on the NO<sub>x</sub> Formation of Hydrogen Coaxial Jet Turbulent Diffusion Flames,” Trans. of KSME(B), Vol.25, No.2, pp.147-156, 2001.
  - 11) J. T. Oh, J. W. Seo, K. I. Lee, J. I. Park, Y. H. Choi and J. H. Lee, “Visualization of Urea Mixing Characteristics by Mixer and Diffuser in SCR System,” Fall Conference Proceedings, Vol.I, KSAE, pp.326-332, 2007.