

SCR 시스템의 요소용액 미립화 및 분해반응 특성 예측에 관한 전산 해석 연구

류승협† · 김주연* · 민병수* · 하지수*

(원고접수일 : 2004년 5월 25일 , 심사완료일 : 2004년 6월 22일)

A Research on the Characteristics of Spray-Induced Mixing and Thermal Decomposition of Urea Solution in SCR System

Seung-Hyup Ryu† · Joo-Youn Kim* · Byung-Soo Min* · Ji-Soo Ha*

Abstract : The spray-induced mixing characteristics and thermal decomposition of aqueous urea solution into ammonia have been studied to design optimum sizes and geometries of the mixing chamber in SCR(Selective Catalytic Reduction) system. The cold flow tests about the urea-injection nozzle were performed to clarify the parameters of spray mixing characteristics such as mean diameter and velocity of drops and spray width determined from the interactions between incoming air and injected drops. Discrete particle model in Fluent code was adopted to simulate spray-induced mixing process and the experimental results on the spray characteristics were used as input data of numerical calculations. The simulation results on the spray-induced mixing were verified by comparing the spray width extracted from the digital images with the simulated particle tracks of injected drops. The single kinetic model was adopted to predict thermal decomposition of urea solution into ammonia and solved simultaneously along with the verified spray model. The hot air generator was designed to match the flow rate and temperature of the exhaust gas of the real engines. The measured ammonia productions in the hot air generator were compared with the numerical predictions and the comparison results showed good agreements. Finally, we concluded that the design capabilities for sizing optimum mixing chamber were established.

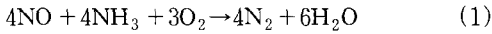
Key words : NO_x(질소 산화물), SCR(Selective Catalytic Reduction), Urea Solution(요소 용액), Mixing Chamber(혼합기), Pyrolysis(열분해)

† 책임저자(현대중공업 산업기술연구소 엔진연구실), E-mail : shryu2@hhi.co.kr, T : 052-230-3228

* 현대중공업 산업기술연구소 엔진연구실

1. 서 론

최근 몇 년간 도시 지역에서의 질소 산화물 배출을 제어하기 위해 배기가스에서 나오는 질소 산화물을 제거하는 기술에 대한 많은 연구가 이루어졌다. 특히 1970년대 초기 이후 타이타니아와 바나디아 기반의 촉매와 암모니아를 환원제로 사용하는 선택적 촉매 환원(SCR, Selective Catalytic Reduction) 방법의 실효성이 대두되면서, 디젤 기관 배기가스 중의 질소 산화물의 배출을 줄이는데 중요하게 사용되고 있다. SCR 공정은 식(1)과 같이 산소 존재 하에 암모니아에 의한 질소산화물의 환원 과정이 일어나 질소와 물로 전환되는 과정이다.



선택적 촉매 환원법에서 사용되는 가장 보편적인 환원제는 암모니아(NH₃)이지만, 기체상의 암모니아는 잠재적인 폭발 가능성이 있으며 유독성 물질이다. 또한 무수화물 가스(anhydrous gas)나 물에 용해된 용액 상으로 암모니아를 저장해야 한다는 것이 이 기술의 단점중의 하나이다. 이러한 단점을 극복하기 위해 요소(urea) 용액을 환원제로 사용하는 연구가 진행 중이며, 실제로 많은 곳에서 적용되고 있다.

Fig. 1은 중속 디젤 기관(medium-speed diesel engine)인 “현대 힘센 엔진(HYUNDAI HiMSEN engine)”에 당사에서 개발하여 장착한 SCR 시스템으로, 이것은 Fig. 2의 개략도와 같이 배기가스 흡입관(inlet exhaust gas line), 혼합기(mixing chamber), 반응기(reactor), 배기가스 배기관(outlet exhaust gas line)의 네 부분으로 구성되어 있다.



Fig. 1 Installed SCR system in HiMSEN engine



Fig. 2 Schematic diagram of SCR system

이중에서 혼합기는 대체 환원제로서 사용되는 요소 용액이 노즐을 통해 분사되어 배기가스와의 열전달에 의해 암모니아로 전환되는 공간으로, 요소 용액의 충분한 암모니아로의 전환, 요소 물질의 정량 공급, 관석 방지 등의 기술적인 측면과 경제적인 측면을 고려한 설계 기술이 필요하며, 특히 선박과 같은 운송용 디젤 기관의 경우에는 협소한 설치 공간으로 인하여 콤팩트한 설계가 요구된다. 요소 용액의 암모니아로의 전환 과정을 살펴보게 되면, 엔진에서 배출되는 배기가스와 혼합기내로 분사된 요소 용액(urea solution)이 만나, 먼저 액적 표면의 물이 증발된 후 고형 혹은 용융 상태의 요소가 생성된다.(Fig. 3) 이러한 요소 분체는 다시 기체상의 암모니아로 열분해 되어 SCR 반응기 내의 촉매단으로 유입된다. 이러한 반응 경로를 거치기 때문에 노즐로부터 분사된 액적의 공간적 입경 분포 및 속도 분포, 분사 각도와 배기가스의 유속, 압력, 온도 분포에 따라 요소용액의 증발 특성과 암모니아의 생성에 미치는 영향이 클 것임을 예측할 수 있다.

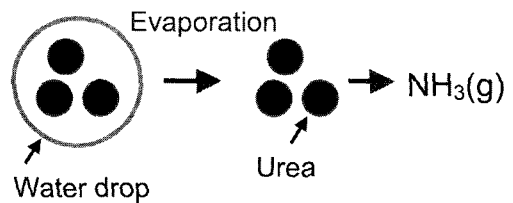


Fig. 3 Decomposition mechanism of urea solution to ammonia

본 연구에서는 선정된 요소 용액 분사 노즐의 분무 특성을 파악하고, 미립화된 액적들과 유입되는 공기와의 혼합 특성을 대기 조건하에서 실험을 통하여 조사하였다. 이 결과를 실험에 사용된 노즐과 동일한 cone-injection 타입을 모델로 한 전산 해석 결과와 비교하여 전산 해석적 접근의 신뢰성을 확보하였다. 이어서 고온 가스 상에 분사된 요소 용액의 열분해 반응을 모사하기 위해 단일 반응율 모델(single reaction rate devolatilization model)을 적용하고, 모델 상수는 실험을 통하여 결정하였다. 최종적으로 요소 용액의 열분해 반응에 의한 암모니아 생성율을 각각 전산 해석과 실험에 의한 결과들의 상호 비교를 통하여 신뢰성을 검증한 뒤, SCR 시스템의 최적화된 혼합기 설계를 위한 기초 자료로 활용하였다.

2. 실험장치 및 방법

2.1 요소 용액 분무 특성 실험

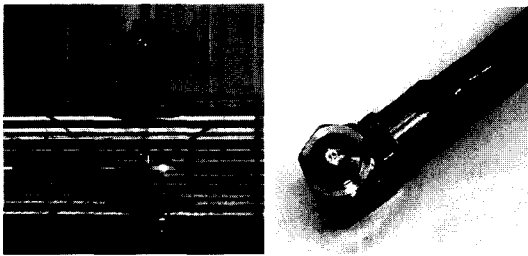


Fig. 4 Acrylic duct for spray visualization and urea injection nozzle

Fig. 4는 요소 용액의 분무 혼합 특성을 가시화하기 위한 실험 장치와 사용된 분사 노즐이다. 본 연구에서 채택한 노즐은 2유체 노즐(twin-fluid atomizer)로서, 요소 용액은 노즐의 여섯 개의 구멍을 통해 분사각 70°로 관내에 직접 분사된다. 원통형 관은 분사된 액적과 유입 공기의 혼합 특성을 살펴보기 위하여 내경 300mm, 길이 3m의 아크릴로 제작되었다. 상온의 공기가 원통형의 관내를 그림의 좌측에서 우측으로 각각 1.3, 5.4, 12.2 m/s의 유입 속도를 가지고 지나가며, 관의 중심에서 하류 방향으로 요소 용액이 노즐을 통해

분사된다. 분무 특성을 나타내는 지표로서는 PDPA (Phase Doppler Particle Analyzer, Aerometrics Co.)로 계측된 액적 직경의 분포와 PIV (Particle Image Velocimetry, La Vision Inc.)로 측정된 액적의 분무 속도 분포를 이용하였다. 테스트를 위한 요소 용액 분사 노즐의 분사 조건은 Table 1과 같다.

Table 1 Test conditions for the measurement of spray characteristics

	Air Injection Pressure (bar)	Liquid Injection Pressure (bar)	Liquid Flow Rate (l/hr)
case 1	0.6	0.7	5.3
case 2	1.1	1.2	6.2
case 3	1.9	2.0	6.6

2.2 요소 열분해 반응 실험

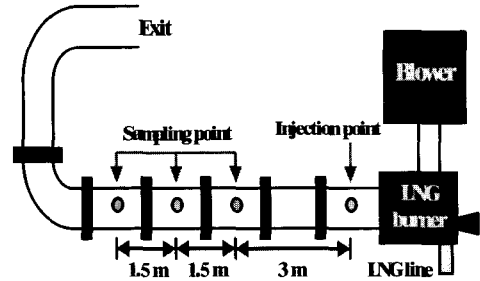


Fig. 5 Schematic diagram for thermal decomposition experiments of urea solution

Fig. 5는 요소의 열분해에 의해 생성된 암모니아의 농도 측정을 위한 실험 장치의 개략도이다. 엔진 배기가스의 온도와 유량 조건을 모사할 수 있도록 1200℃의 배기가스를 LNG 버너를 통해 생성한 후, 이를 상온의 공기와 혼합하여 Table 2와 같은 온도와 유량 조건으로 관내로 흘려보낸다. 이때 요소 용액은 버너 출구로부터 1.5m 지점에 설치된 분무 노즐을 통해 하류 방향으로 관내의 중심에서 분사된다. 암모니아의 농도 측정은 MIDAC사의 FT-IR (Model NO.I2000)을 사용하였으며, FT-IR의 측정부는 요소 분해 과정에

서 발생 가능한 부산물들에 의한 오차를 최소화하기 위해 5분마다 질소 가스를 이용하여 제거하였다. 측정 위치는 노즐 출구로부터 하류 방향으로 각각 3m, 4.5m, 6m 떨어진 곳이며, 각 측정부는 암모니아의 생성량을 계산과 비교하기 위하여 관 바닥에서 상부까지 여섯 개의 지점에서 값을 취득한 후 이를 평균하였다. 요소 용액(40wt% solution)은 2 bar의 분사 압력을 가지고 분당 18 cc의 유량으로 분사되는데, 만약 분사된 요소 용액이 모두 암모니아로 전환된다면 암모니아의 유량은 분당 6ℓ에 상응한다.

Table 2 Test conditions of the combustion gases

Gas Temp. [°C]	Avg. Velocity [m/s]	Gas Density [kg/m ³]	Volume Flow Rate [m ³ /min]	NH ₃ 100% conversion [ppm]
300	6.55	0.616	27.78	454.7
	9.04		38.35	329.5
	10.99		46.59	271.2
350	6.39	0.567	27.08	507.2
	9.08		38.49	356.9
	10.77		45.69	300.6
400	6.03	0.524	25.55	580.7
	8.33		35.33	420.0
	10.84		45.97	322.8

3. 전산 해석적 접근

요소 용액의 분무 거동과 열분해 반응의 전산 해석적 접근을 위해서 상용 코드인 Fluent v6.0을 이용하였다. 요소 용액의 미립화에 의한 열분해 반응의 전산 모델은 유입되는 배기가스를 해석하기 위한 연속상(continuous phase)과 미립화된 액적의 입자를 따르는 또 다른 상(discrete phase)으로 구분하여 접근하는 DPM (Discrete Phase Model) 모델을 적용하였다^[1]. 전산 해석에서는 액적의 궤도를 추적하면서(Lagrangian flow description) 이를 둘러싼 주위 가스와의 열전달과 물질 전달량, 그리고 이에 따른 두 개의 영역들 간의 변화를 반복 계산하면서 결과에 접근한다. 이때 요소 용액 분무 모델은 앞서 언급한 데

로 실험에 사용된 노즐과 동일한 cone-injection 타입의 모델을 적용하였다.

요소 용액의 열분해 반응을 예측하기 위한 모델로는 석탄 연소의 시뮬레이션에 사용되는 증발·기화 모델인 단일 반응을 모델(single kinetic rate devolatilization model)을 적용하였다.^[1] 아래 식(2)와 식(3)에서 보여 지듯이, 본 모델은 반응율이 Arrhenius 식에 기본을 둔 식에 의하여 모델화된다. 식에서 $m_p(t)$ 는 주어진 시간에 해당되는 요소 입자의 질량에 해당하며, k , $f_{w,0}$, E 는 각각 속도율(kinetic rate), 요소 입자의 초기 함수율(initial mass fraction), 활성화 에너지(activation energy)를 나타낸다.

$$m_p(t) = m_{p,0}(1 - f_{w,0}) \cdot \exp(-k \cdot t) \quad (2)$$

$$k = A_1 \exp\left(-\frac{E}{RT}\right) \quad (3)$$

4. 결과 분석 및 고찰

4.1 분사 노즐의 분무 특성

요소 용액 분사 노즐의 분무 특성을 파악하기 위해 PDPA 시스템을 이용하여 노즐 출구로부터 100mm 되는 지점에서 액적 직경을 측정하였다. Fig. 6은 Table 1의 세 번째 경우에 해당하는 조건인 미립화용 공기 1.9 bar, 액체 2.0 bar로 분사되었을 때 측정된 액적 직경 분포이다.

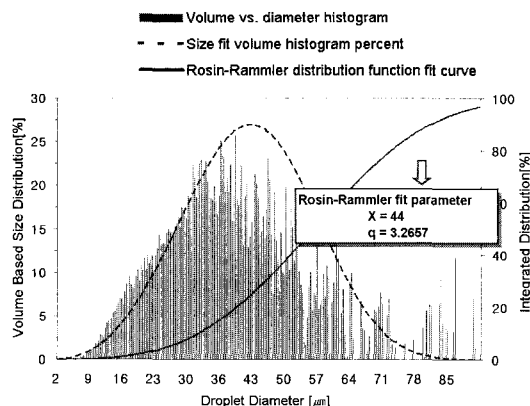


Fig. 6 Measured drop size distribution in case 3

액체가 노즐을 통하여 분사되면 미립화가 이루어져 수많은 액적들로 나뉘며, 특별한 경우를 제외하고는 이러한 액적들은 공간적으로 임의의 분포를 가지게 된다.⁽²⁾ 흔히 분무 상태를 특성화하는 값으로 미립화된 액적의 대표 입경(SMD: Sauter Mean Diameter)이 사용되기도 하지만, 이러한 단일 대표값 만으로는 유입되는 공기와 분사된 액적들 사이의 상호 작용을 제대로 표현하기 어렵다. 따라서 본 연구에서는 노즐로부터 생성된 다양한 액적 직경들의 분포를 식(4)와 같이 Rosin-Rammler 분포 함수를 적용하여 나타내었다. 이러한 결과가 Table 3과 Fig. 7에 보여진다. 측정된 액적 직경 분포는 이후 수행된 전산 해석을 위한 분무 모델의 입력값으로 사용된다.

$$1 - v(d) = \exp \left[- \left(\frac{d}{X} \right)^q \right] \quad (4)$$

Table 3 Rosin-Rammler function parameter calculated from experimental results.

X	62.3	45.6	44
q	2.2357	2.7491	3.2657

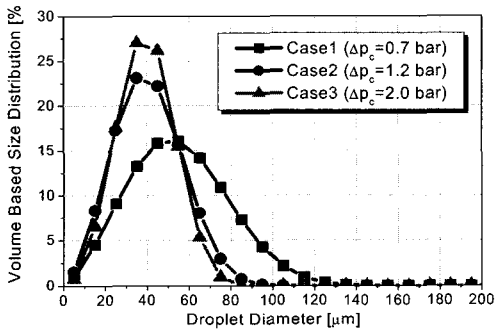
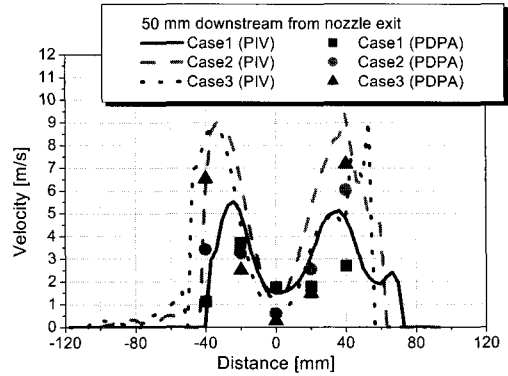
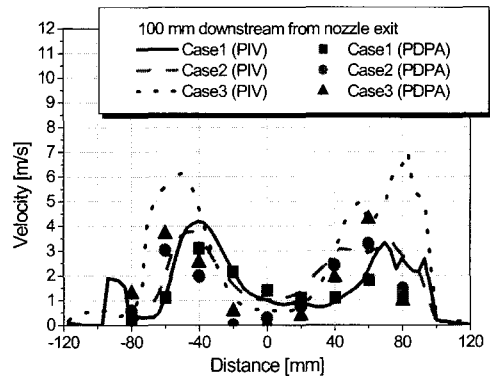


Fig. 7 Drop size distribution used as an input data for numerical calculation

Fig. 8은 PDPA와 PIV 시스템을 이용하여 노즐의 출구로부터 각각 50mm와 100mm 지점에서 측정된 액적의 속도이다. PDPA가 측정 지점에서의 평균값을 취하는 데에 대해 PIV는 속도장을 얻어내게 되므로 두 시스템의 측정 방법에 따른 차이는 있지만, 측정 결과는 유사한 형태를 보인다.



(a) 50 mm downstream from nozzle exit



(b) 100 mm downstream from nozzle exit

Fig. 8 Comparison of measured drop velocity using PDPA and PIV system

노즐 출구에서의 액적 초기 속도는 노즐 출구로부터 각각 50mm와 100mm 떨어진 지점에서의 액적 속도를 실험으로부터 얻어낸 뒤 외삽(extrapolation)하여 계산되었으며, 그 결과가 Table 4에 나타나 있다. 노즐 출구에서의 액적 초기 속도 또한 전산 해석을 위한 분무 모델의 입력값으로 적용되어, 앞서 측정된 직경 분포로 표현되는 질량값과 함께 미립화된 액적이 가진 운동량을 나타낸다.

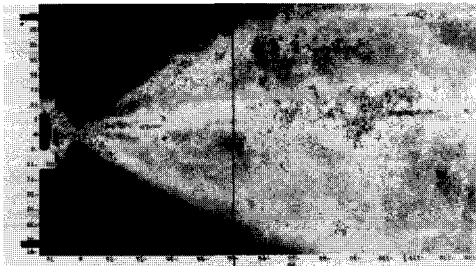
Table 4 Mean drop velocity at the nozzle exit

	case 1	case 2	case 3
u_d [m/s]	6.7	9.5	10.6

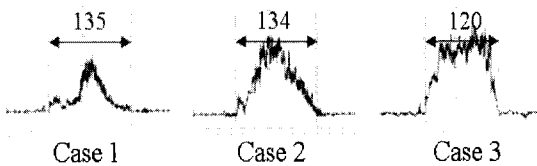
4.2 분사 액적과 유입 공기의 혼합 특성

관내를 지나가는 공기와 분사된 액적들과의 혼합 거동을 파악하기 위해 앞서 Fig. 4에 보여진 아크릴로 제작된 가시화 실험 장치를 이용하였다.

관내로 유입되는 공기의 속도를 1.3~12.2m/s로 변화시켜 가면서, Table 1과 같은 세 경우의 조건으로 액체를 노즐을 통해 관내에 분사시켰다. 이의 가시화를 위해 디지털 CCD 카메라와 Nd-Yag 레이저의 평면광(sheet beam)을 이용해 분무 단면의 영상을 촬영하였다. Fig. 9(a)는 유입 공기 속도를 5.4 m/s로 하여 노즐로부터 분사되는 분무 형상을 획득한 예이다. 획득된 영상은 Fig. 9(b)에서 보여 지는 것처럼 화상 처리(image processing)를 통하여 노즐 출구로부터 100mm 지점에서의 그레이 레벨(grey level)을 분석하여 각각의 경우에 따라 분무된 액적군의 밀집도와 분무폭(spray width)을 얻어내었다.



(a) Example of captured spray image



(b) Image processing examples of spray width measurement at 100 mm downstream from the nozzle exit with inlet air velocity, $u_{in} = 5.4\text{m/s}$

Fig. 9 Examples of captured spray image and image processing for spray width measurement

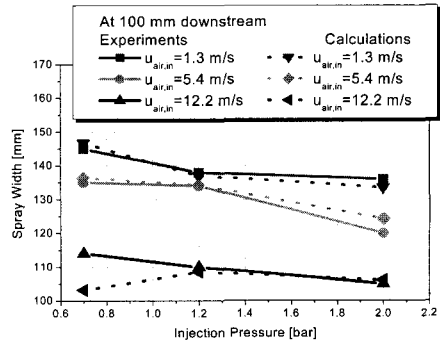


Fig. 10 Comparison of measured spray width with numerical one at 100 mm downstream from the nozzle exit

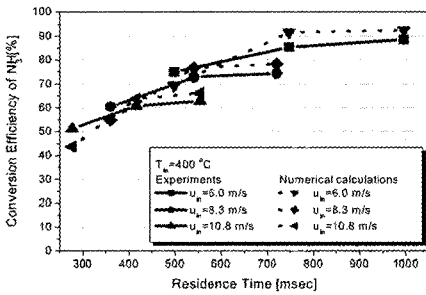
분무폭은 분사 압력, 액적 직경, 액적의 분사 속도, 분사 각도, 주위 공기의 유입 속도 등에 관계하여, 관내로 유입된 공기와 노즐을 통해 분사된 액 적간의 혼합 특성을 설명하는 지표가 된다. 따라서 실험을 통해 얻어진 분무폭과 전산 해석의 입자 경로에 의한 분무폭을 상호 비교하여, 적용된 분무 모델의 신뢰성을 평가하는 기준으로 하였다. 공기의 유입 속도와 분사 조건에 대한 실험 및 전산 해석의 결과가 Fig. 10에 나타나 있다.

결과에서 보여지는 바와 같이 전산 해석적 접근으로 얻어진 분무폭과 실험에 의해 파악된 분무폭은 전반적으로 잘 일치하고 있으며, 이들 결과로부터 전산 해석에 적용된 분무 모델이 유입 공기와 분사 액적간의 상호 작용에 의한 혼합 특성을 적절히 예측하고 있는 것으로 판단된다.

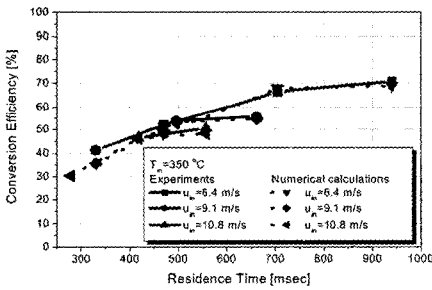
4.3 전산 해석을 통한 요소 열분해 반응 예측

노즐로부터 분사된 요소 용액이 암모니아 기체로 완전히 전환하는 데 필요한 시간은 유입되는 배기가스의 속도와 관계하여 SCR 시스템의 혼합기의 길이를 결정하기 위한 중요한 설계 인자가 된다. 이때 유입되는 가스의 유량과 노즐에 의해 분사된 요소 용액의 양에 따라 생성 가능한 암모니아의 최대량은 달라진다. 따라서, 본 논문에서는 시간 경과에 따른 암모니아 생성량을 최대 생성 가능량에 대한 백분율로 나타내어 이를 요소 용액의 암모니아 기체로의 전환율(conversion efficiency)로 정의하였다.

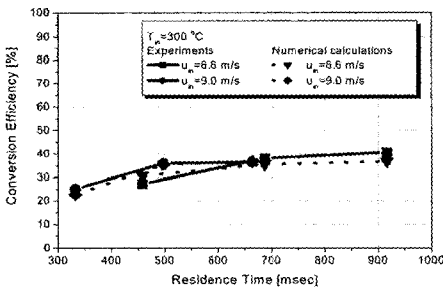
Fig. 11은 Table 2와 같은 조건으로 유입된 고온 가스에 요소 용액을 분사하여 암모니아로 전환되는 비율을 실험과 전산 해석을 통하여 얻은 각각의 결과이다. 유입되는 가스 온도가 상승함에 따라 암모니아의 생성량은 증가하지만, 동일한 온도 조건에서 가스 속도가 증가하면 체류 시간이 감소하게 되므로 생성량은 감소하게 된다.



(a) $T_{in} = 400 \text{ }^\circ\text{C}$



(b) $T_{in} = 350 \text{ }^\circ\text{C}$



(c) $T_{in} = 300 \text{ }^\circ\text{C}$

Fig. 11 Experimental results of conversion efficiency of urea decomposition to ammonia

Fig. 11에 나타난 모든 곡선의 형상에서 시간이 경과할수록 열분해 반응에 의한 전환율의 기울기가 완만해짐을 알 수 있는데, 이러한 결과로부터 암모니아로의 전환율과 혼합기내에서의 체류 시간, 다시 말해 혼합기의 길이를 상관하여 최적화된 설계가 이루어져야 할 필요가 있음을 알 수 있다.

열분해 반응 예측을 위한 전산 해석 모델은 앞서 적용된 분사 모델과 식(2)에 나타난 단일 반응율 모델(single kinetic rate devolatilization model)을 이용하였으며, 이때 적용된 모델 상수는 아래에 나타난 식(5)와 같다.

$$k = 382 \cdot \exp\left(-\frac{2.94 \times 10^7}{RT}\right) \quad (5)$$

Fig. 12는 관내로 350°C의 온도와 6.4 m/s의 속도를 가진 가스가 유입될 경우의 요소 용액 분사에 따른 온도 분포와 암모니아의 농도 분포의 변화를 계산한 결과이다.

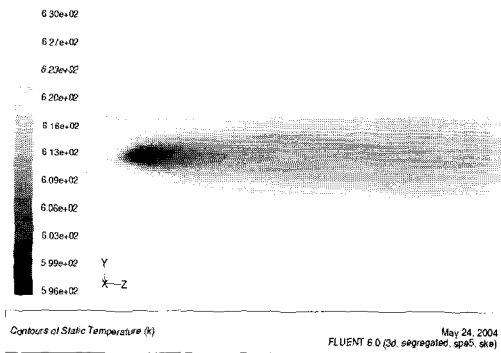
요소의 열분해 반응은 물의 증발이 먼저 일어나고 요소의 분해가 일어난다. 물의 증발이 일어날 때 기화 과정에서의 높은 엔탈피로 인하여 주변의 온도에 영향을 끼칠 수 있으므로 열분해 반응 과정 중 물의 증발의 효과가 선행되어 고려되어야 한다. 그러나 Fig. 12(a)의 결과에서 보여지는 것처럼 증발에 의한 온도 강하는 15°C 이내로, 온도 영역(temperature field)이 분사 노출의 주위를 제외하고는 거의 균일하다. 이것은 유입되는 가스 유량에 대해 분사되는 물의 양이 매우 작기 때문으로, 높은 가스 온도로 인해 증발이 노출 주위에서 빠르게 이루어지기 때문이다. 따라서 물의 증발에 의한 온도 강하의 영향은 본 연구 결과에서는 크게 나타나 에너지에 대해 무시할 만한 양이 아니라면 증발에 의한 효과가 나타나게 될 것으로 사료된다. 또한 본 연구에서 적용한 전산해석 방법은 물의 증발 효과를 고려하고 있기 때문에 증발 효과가 큰 경우에도 암모니아 생성을 적절히 예측할 수 있을 것으로 판단된다. 이러한 영향은 Fig. 12(b)에서 보여지는 것처럼 암모니아의 생성량이 노출 주위에서 급격하게 변하면서 하류 방향으로 갈수록 변화량이 적어지는 결과에서도 확인할 수 있다.

암모니아 생성에 대한 전산 해석적 예측 결과들은 실험 결과들과 함께 앞선 Fig. 11에 나타나 있다. 실험 결과들과 전산 해석에 의한 예측은 부분적인 차이를 보이곤 있지만, 전반적으로 잘 일치하고 있다. 실험 결과와 전산에 의한 예측 결과에서 나타나는 차이는 요소 용액의 열분해 반응 예측 시 단순화된 반응 모델이 사용되었다는 점과 요소 용액 분무 모델에서의 입력 값으로 사용되는 액적 직경과 속도 분포가 실제 분무 거동의 공간적, 시간적 변화를 완벽하게 표현하기에는 무리가 있다는데 원인이 있는 것으로 판단된다. 그럼에도 불구하고 SCR 시스템의 최적화된 혼합기의 크기를 결정하기 위한 방법으로 전산 해석에 의한 요소 열분해 반응의 예측 방법은 상당한 효과가 있는 설계 자료로서 활용될 수 있다.

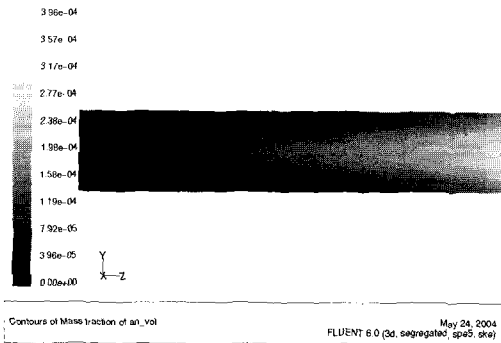
5. 결 론

SCR 시스템에 적용되는 혼합기의 최적화된 크기와 형상을 결정하기 위해 본 연구에서는 요소 수용액의 분무 거동 및 주위 가스와의 혼합 특성과 열분해 반응에 의한 암모니아로의 전환율을 전산 해석적으로 예측할 수 있도록 접근하였다. 이러한 접근을 위해 실험과 전산 해석 방법을 병행하여, 상온에서의 요소 수용액의 분무 특성 및 디젤 기관의 배기가스 조건에서의 열분해에 의한 암모니아의 생성을 조사하였다. 본 연구에서 얻어진 결론은 다음과 같다.

1. 노즐에 의해 분사된 요소 용액의 분무 특성과 유입 공기와의 혼합 특성을 조사하기 위해 상온에서 분사된 액적의 직경, 액적 속도, 분무폭을 측정하고, 이 결과를 전산 해석을 위한 분무 모델에 적용하였다.
2. 분무된 요소 용액과 배기가스와의 혼합 특성에 대한 전산 해석의 신뢰성 파악을 위해 CCD 카메라를 통해 획득한 이미지와 시뮬레이션된 입자가 갖는 경로에 의한 분무폭을 상호 비교한 결과 관내 분무 특성과 혼합특성을 잘 예측함을 알 수 있었다.
3. 요소 수용액의 열분해 반응에 의한 암모니아의 생성을 예측하기 위한 전산 해석 모델로 DPM (Discrete Phase Model) 모델과 단일 반응율 모델(single kinetic model)을 채택하여 암모니아로의 전환율을 예측한 결과는 실험에 의한 결과에 대해 5% 이내의 오차를 보이며 전반적으로 잘 일치하고 있다.
4. 전산 해석에 의해 예측된 결과는 고온 가스 발생기로부터 생성된 가스에 요소 용액을 분사하여 얻어진 실제 암모니아 생성 결과와 잘 일치하였으며, 이러한 전산 해석적으로 예측된 결과는 SCR 시스템에 적용되는 혼합기의 최적 설계를 위한 기초 자료로 활용 가치가 있다.



(a) Temperature distribution



(b) Ammonia distribution

Fig. 12 Computational results on the temperature and ammonia distributions ($u_{in}=6.4\text{m/s}$, $T_{in}=350\text{ }^\circ\text{C}$)

참고문헌

- [1] Fluent v6.0 manual, 2003
 [2] 이상용, "액체의 미립화", 1996
 [3] "H. L. Fang, H. F. DaCosta, "Urea Thermolysis and NOx Reduction with and without SCR Catalysis.", Applied Catalysis B, Article in press

저 자 소 개



류승협 (柳昇協)

1972년 11월생, 1999년 경북대학교 기계공학과 졸업(학사), 2001년 경북대학교 기계공학과 졸업(석사), 2001년~현재 현대중공업 산업기술연구소 재직중



김주연 (金柱延)

1969년 11월생, 1992년 한국과학기술원 기계공학과 졸업(학사), 1994년 한국과학기술원 기계공학과 졸업(석사), 2000년 한국과학기술원 기계공학과 졸업(박사), 2000년~2004년 현대중공업 산업기술연구소.



민병수 (閔丙壽)

1970년 3월생, 1993년 한국과학기술원 화학공학과 졸업(학사), 1995년 한국과학기술원 화학공학과 졸업(석사), 1995년~현재 현대중공업 산업기술연구소 재직중



하지수 (河芝洙)

1960년 6월생, 1983년 서울대학교 항공공학과 졸업(학사), 1985년 한국과학기술원 항공공학과 졸업(석사), 1991년 한국과학기술원 항공공학과 졸업(박사), 1991년~현재 현대중공업 산업기술연구소 재직중