

디젤 배기관내 우레아 수용액의 증발 및 혼합 특성에 관한 연구

김 남 일¹⁾ · 김 종 민²⁾ · 김 만 영³⁾

세움 개발본부¹⁾ · 한국선급 시스템안전연구팀²⁾ · 전북대학교 항공우주공학과³⁾

A Numerical Study on the Evaporation and Mixing Characteristics of Urea Water Solutions in the Diesel Exhaust Pipe

Namil Kim¹⁾ · Chongmin Kim²⁾ · Man Young Kim³⁾

¹⁾Development Division, Sewoom, 22-19 Jeongsin-ro, Jeongeup-si, Jeonbuk 56168, Korea

²⁾System Safety Research Team, R&D Division, Korean Register, 36 Myeongji Ocean City 9-ro, Gangseo-gu, Busan 46762, Korea

³⁾Department of Aerospace Engineering, Jeonbuk National University, Jeonbuk 54896, Korea

(Received 14 December 2022 / Revised 6 January 2023 / Accepted 6 January 2023)

Abstract : Clean diesel and their corresponding post-treatment technologies have been developed to satisfy more stringent emission regulations in the automotive industry. The purpose of this study is to investigate the evaporation and mixing characteristics of the urea water solution injected into the exhaust pipe. After validating the present numerical solution with available data in the literature, the effects of various parameters, such as the injector angle, spray cone angle, and urea mass injected into the exhaust pipe, were investigated. Although the 45-degree injector angle has the most uniform reductant distribution characteristics, the 5-degree injector angle is suitable for diesel exhaust pipes considered in this study due to the wall-wetting of the urea water solution and urea salt. Also, NH₃ uniformity is improved by increasing the spray cone angle due to the increase in contact area between the exhaust gas and the urea water solution. Finally, NH₃ uniformity is nearly uniform regardless of the injected urea mass.

Key words : Urea-SCR(우레아 선택적 촉매 반응 시스템), Evaporation(증발), Mixing(혼합), NH₃(암모니아), NO_x(질소산화물), Uniformity(균일도)

1. 서론

강화되는 배기규제 대응을 위하여 디젤엔진에서 배출되는 PM(Particulate matter, 입자상물질)과 NO_x(Nitrogen oxide, 질소산화물) 배출량 감소가 요구되며, 이를 저감시키는 엔진기술 향상과 함께 후처리장치 적용이 필요하다. NO_x 저감 후처리장치 중에서 Urea-SCR은 배기가스에 존재하는 여러 화학종 중 NO_x만을 선택적으로 환원시키는 장치로서 가장 유망한 NO_x 저감 장치로 주목받고 있다.

SCR 시스템 환원제인 NH₃는 배기관에서 직접 분무된 우레아수용액 가수분해와 열분해 반응을 거쳐 생성되기 때문에 충분한 반응시간이 요구된다. 따라서 분사된 우

레아 NH₃ 변환시간은 Urea-SCR 시스템 설계에 있어 DeNO_x 효율에 영향을 주는 주요 인자이다. 또한, NH₃가 배기관을 통과하여 SCR 촉매 전단에 고르게 분포하면 SCR 촉매 전체 표면적을 효율적으로 사용할 수 있기 때문에 DeNO_x 효율이 향상되어 우레아 낭비를 줄일 수 있으며, 국부적으로 NH₃가 반응하지 못해서 나타나는 NH₃ Slip 발생을 현저히 줄일 수 있다. 따라서 배기관을 통과한 SCR 촉매 전단 NH₃ 농도분포는 DeNO_x 효율에 영향을 주는 주요 인자이다.

승용디젤 엔진의 NO_x 정화효율 향상을 위해 황인구 등¹⁾은 Urea-SCR 시스템 유동 및 분무 특성을 해석과 대상 엔진 시험을 통해 믹서(Mixer) 적용 시 담체 입구에서

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

¹⁾This is an Open-Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License(<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium provided the original work is properly cited.

의 유동균일도 지수와 암모니아 농도 균일도 지수가 증가하는 것을 보였다. 인젝터 분무 특성에 대한 연구를 통해 NOx 저감효과를 연구한 최윤준 등²⁾은 SCR 촉매 전단에 이르기 전까지 가수분해를 촉진시키기 위해 뛰어난 무화성능과 배기조건의 빠른 반응성과 정량분사성능이 요구됨을 고찰하였다. Jeong 등³⁾은 Urea-SCR 배기 시스템에서 우레아수용액 분사 각도 그리고 인젝터 분사구 개수와 분사위치가 SCR 촉매 전단에서 암모니아 농도 분포 균일도에 미치는 영향을 실험과 수치해석을 통하여 분석하였다. 또한, Kim 등⁴⁾의 실험과 전산해석을 이용하여 우레아수용액의 분무 특성과 디젤 기관 배기가스 조건에서의 열분해에 의한 암모니아 생성을 고려한 최적화된 SCR 시스템 설계를 제안하였다. 한편, Birkhold 등⁵⁾은 다양한 물리적 모델에 따른 증발 과정을 설명하기 위해 확산 제한(Diffusion limit) 모델이 액적의 경사도 때문에 빠른 혼합(Rapid mixing) 모델보다 표면에서 더 높은 우레아 농도를 가진다는 것을 예측하였다. 이를 통해 우레아수 단일액적으로부터 물의 증발에 따른 환원제 분포와 전환율을 예측하기 위한 연구를 진행하였다.

본 연구에서는 상용 CFD 코드인 AVL Fire^{TM 6)}을 이용하여 계산된 값을 Birkhold 등⁵⁾의 해석값과 비교하여 수치해 검증을 거친 후 아레니우스(Arrhenius) 형태 방정식으로 표현된 분열 모델 매개변수를 설정하였다. 또한, Urea-SCR 시스템 배기관에 우레아 수용액을 분사하는 인젝터(Injector) 설치각도, 우레아 분무각도, 그리고 우레아 분사량에 따른 우레아 수용액 증발과 혼합특성에 대해서 고찰하였다.

2. 수치해석

2.1 지배방정식 및 수치해석 기법

배기관에 분사되는 우레아수용액 증발과 혼합특성을 고찰하기 위하여 내부유동은 압축성, 반응 그리고 비정상 상태 3차원 난류 유동으로 가정하였고, 전산해석을 수행을 위해, 유한체적법(FVM)에 기반하는 상용 CFD 코드인 AVL Fire^{TM 6)}의 증발과 열분해 모델을 사용하였다. 액체 미립화와 거시적 분포 거동 해석을 위해 연속체 성격이 뚜렷한 주변 기체 유동장에 대해서는 오일러(Euler) 관점으로, 비연속적인 입자들의 거동 특성을 가지는 우레아수용액 분무 입자들은 라그랑지(Lagrange) 관점으로 각 입자를 추적하여 거동을 해석하였다.⁷⁾ 그리고 두 상(Phase)간의 운동량과 에너지 전달은 오일러 상(Eulerian phase) 수송 방정식의 소스 항(Source term)에 의해 반영하였다. 그리고 액적 증발모델은 SCR-thermolysis

를 적용하였으며, 이 모델에서 열해리율은 Birkhold 등⁵⁾에 의해 정의된 매개변수를 적용한 아레니우스 타입(Arrhenius-type) 방정식을 적용하였다. 난류 확산은 Gasman-Ioannides에 의해 정의된 모델을 사용하였으며,⁸⁾ 난류 모델은 Standard $k-\epsilon$ 방정식을 적용하였다.⁵⁾ 또한, H₂O의 가수분해는 CHEMKIN chemistry solver⁹⁾를 AVL Fire^{TM 6)}에 적용하여 균일가스상 반응으로 고려하였다. 액막은 Multi-component 모델을 적용하였으며, 벽면으로부터의 영향을 표현하기 위해 액적의 열 및 물리학적 특성의 영향을 받는 무차원수를 사용하는 Kuhnke의 분무/벽 상호작용모델을 적용하였다.¹⁰⁾ 또한, 결과 비교에 사용된 값은 면적 가중 평균법을 적용하였다.

SCR 촉매 전단에서 암모니아 공간분포는 NOx 전환율에 큰 영향을 미치기 때문에 암모니아 농도 분포 균일도는 중요한 지표이다. 따라서 본 연구에서는 모든 조건에 대해 비교 가능한 기준을 설정하기 위해서 Weltens 등¹¹⁾이 제안한 농도 균일도 지수를 사용하여 모노리스 입구에서 환원제 농도 분포 균일도 지수를 식 (1)을 사용하여 계산하였다. 즉,

$$\gamma = 1 - \frac{1}{2n} \sum_{i=1}^n \frac{|C_i - \bar{C}|}{\bar{C}} \quad (1)$$

여기에서, \bar{C} 는 단면적에서의 평균농도, C_i 는 촉매격자 i 에서의 국부농도를 의미한다. 농도 균일도 지수(γ)는 0에서 1사이의 값을 가지고, 1에 가까울수록 촉매 전단에서의 환원제의 농도분포가 균일하다.¹¹⁾

2.2 수치해석 모델

본 연구에서는 디젤 배기관 인젝터를 통해 분사되는 우레아 수용액 분사조건에 따른 NH₃ 전환율 개선과 비교 연구를 수행하기 위하여 3차원 CAD로 구현된 단품의 형상을 FireTM 코드가 인식할 수 있는 표면데이터(*.stl) 파일로 변환한 후, FAME Hybrid 기능을 이용하여 격자

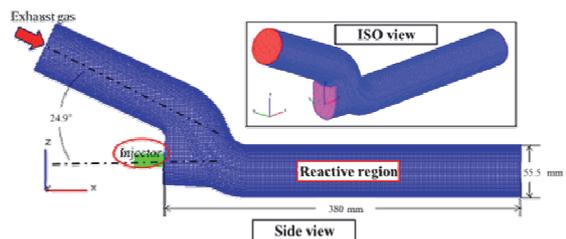


Fig. 1 Side and isometric views of the computational grid system in the exhaust pipe adopted in this work

를 생성하였다.¹²⁾ Fig. 1은 배기관 계산격자 시스템을 나타낸 것이다. 여기에서 유입구와 유출관은 24.9°의각을 이루고, 내경은 55.5 mm, 그리고 반응 영역은 380 mm이다. 또한, 인젝터는 배기관내 반응 영역의 시작부분인 벽면에서 배출구로 5°, 15° 그리고 45° 각도를 갖고, 노즐 위치는 AVL FireTM 내 Solver spray module을 이용하여 설정하였다.¹⁰⁾ 총 격자수는 약 423,600개이다.

2.3 해석 조건

우레아수용액 분무는 배기관을 통과한 배출가스가 완전히 발달한 상태라고 가정하고, 정상상태에서 얻은 속도와 온도장을 비정상상태 해석의 초기조건으로 사용하였다. 또한, 유입 배기가스 온도는 배기가스 온도가 증가할수록 암모니아 생성량이 증가하는 것과 암모니아 산화 반응이 발생하지 않는 온도를 고려하여¹³⁾ 유입배기가스 온도를 573 K으로 설정하였다. 배기가스 유량은 39.6 g/s, 출구압력은 대기압인 1 atm, 그리고 외부온도에 의한 영향을 차단하기 위해 배기관은 단열로 설정하였다. 분사조건으로는 3구홀 노즐에서 우레아수용액을 5 bar 압력으로 0.3 s 동안 분사하고 이때 평균 입자 직경은 80 μm이다. 인젝터를 통해 분사되는 우레아수용액 초기 속도는 32 m/s이고, 우레아 분무 각도는 20°, 30° 그리고 40°로 설정하였다. 또한, 최적 분사조건에서 우레아수용액 분사량 0.1 g을 기준으로 80 ~ 140 %로 조절하여 0.08, 0.10, 0.12 그리고 0.14 g으로 설정하였다. 이러한 조건으로 우레아수용액 분사조건에 따른 우레아수용액 전환율과 암모니아 공간분포에 대하여 해석을 수행하였으며, 해석에 적용된 경계조건을 Table 1에 나타내었다.

Table 1 Boundary and spray injection conditions used in this work

Variables	Unit	Value
Mass flow rate	g/s	39.6
Exhaust gas temperature	K	573
Exit pressure	atm	1
Heat flux	W/m ²	0
Injection pressure	bar	5
Nozzle hole number	-	3
SMD	μm	80
Urea water solution temperature	K	398 (125 °C)
Urea water solution mass	g	0.08, 0.10, 0.12, 0.14
Spray cone angle	deg	20
Initial droplet velocity	m/s	32
Injection time	s	0.3

3. 결과 및 고찰

3.1 수치해석 검증

Urea-SCR 시스템에서 배기관에 분사되는 우레아 수용액 증발과 혼합특성에 관한 3차원 비정상상태 전산해석을 수행하기 위하여 AVL Fire™⁶⁾ 버전을 이용하여 선형 연구된 Birkhold 등⁵⁾의 해석 결과와 본 전산해석의 암모니아 전환율을 비교하여 요소수용액 열분해 현상에 대한 수치해석 검증을 진행하였다. 물의 증발에 대한 분해율 설명을 위해, 확장된 아레니우스 표현(Extended Arrhenius expression)을 사용하여 다음 식 (2)와 같이 표현하였다.^{5,6)} 즉,

$$\frac{dm_u}{dt} = -\pi D_d A e^{(-E_a/RT_d)} \quad (2)$$

여기에서 A=0.42 kg/ms이고, E_a=6.9x10³ J/mol · K이다.

한편, 열평형을 고려한 입자의 열전달은 다음 식 (3)과 같이 표현된다.

$$q_d = \pi D_d \lambda_{g,ref} N^* (T_g - T_d) + \frac{dm_u}{dt} h_{th} \quad (3)$$

본 연구의 열분해율 검증에 사용된 형상 개략도와 측정위치를 Fig. 2에 나타내었다. 배기관 직경은 300 mm이고, 인젝터는 6개 분사구를 가지고 우레아 수용액을 배기관 중앙에서 배기관의 끝부분으로 70°의 각도로 분사하며, 각 위치에서 체류시간(Residence time)에 따른 암모니아 전환율 계산을 위한 세 개의 측정 위치는 혼합기 내에서 인젝터로부터 배기관 끝 부분으로 3 m, 4.5 m, 그리고 6.5 m인 곳에 위치한다. 유입 배기가스 속도는 6.03 그리고 8.33 m/s이고 온도는 400 °C이다. 출구 압력은 1 atm을 적용하였으며, 노즐 직경은 0.1 mm, 인젝터를 통해 분사되는 우레아수용액 유량은 0.33 g/s이고, 분사압력은 2 bar로써 10.6 m/s의 초기 속도를 가진다. 이러한 해석 조건들을 Table 2에 정리하였다. Fig. 3은 체류시간에 따른 암모니아 전환율을 나타낸 것으로서, Birkhold 등⁵⁾의 해석결과와 잘 일치하는 것을 확인할 수 있다.

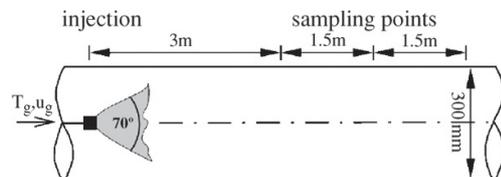


Fig. 2 Experimental setup of Birkhold et al.⁵⁾

Table 2 Boundary conditions used for validation

Variables	Unit	Value
Inlet gas velocity	m/s	6.03, 8.33
Exhaust gas temperature	°C	400
Density	kg/m ³	0.524
Exit pressure	atm	1
Injection pressure	bar	2
Nozzle hole number	—	6
Nozzle hole diameter	mm	0.1
UWS flow rate	g/s	0.33
Cone angle for visualization	deg	70
Initial droplet velocity	m/s	10.6

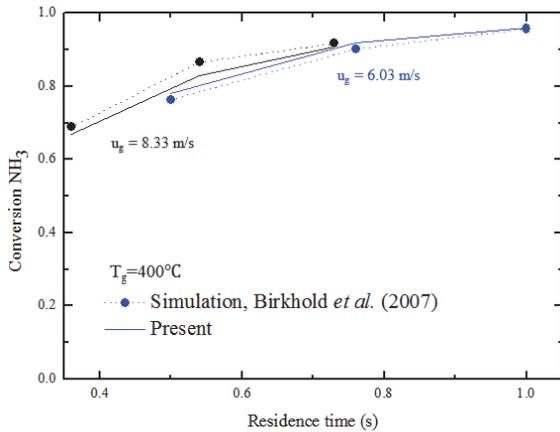
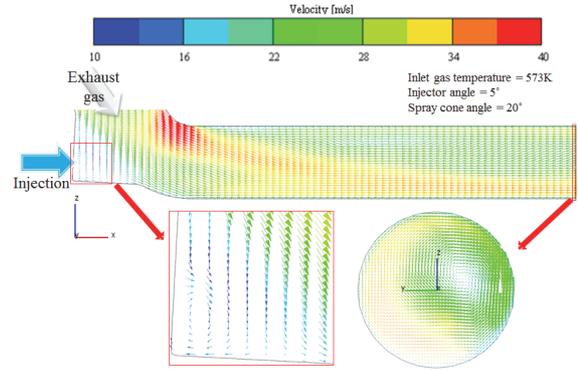


Fig. 3 Comparison of the present numerical solutions

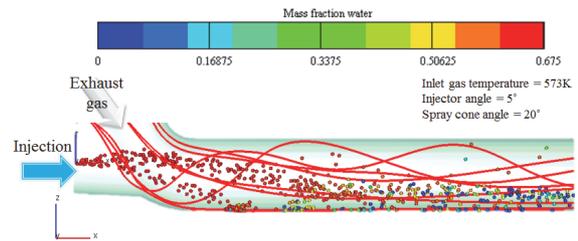
3.2 분무 및 유동 특성

Fig. 4는 우레아 수용액 분사가 끝나는 시점인 $t = 0.7$ s 일 때, 배기관 내 속도벡터 그리고 유체 유선분포와 우레아 수용액 분무거동을 나타낸 것이다. Fig. 4(a)에서 배기가스가 유입될 때 인젝터가 장착된 마운팅 엘보우 (Mounting elbow) 부분에 의해서 발생하는 스윙 유동에 의해 배기관 밑면에 분포해야 하는 빠른 속도 성분들이 배기관 좌측면에 분포하는 것을 알 수 있다. 그리고 이러한 속도 벡터 분포를 통해 분사되는 우레아 수용액이 배기관 하단 벽면을 따라서 이동한다는 것을 예측할 수 있다. Fig. 4(b)는 우레아 액적과 물의 질량분율과 궤적을 나타낸 것으로서, 분사된 우레아 액적들이 배기관 하단 벽면에 주로 분포할 뿐만 아니라 고온의 배기가스와의 혼합으로 인해 물의 증발이 발생하여 물의 질량분율이 점점 감소하는 것을 확인할 수 있다.

Fig. 5는 우레아 수용액 분사가 끝나는 시점인 $t = 0.7$ s 일 때, 배기관 xz 단면과 yz 단면에서의 배기가스 온도와



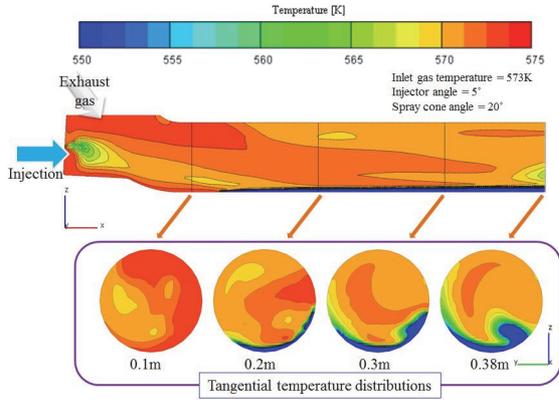
(a) Velocity vector distributions



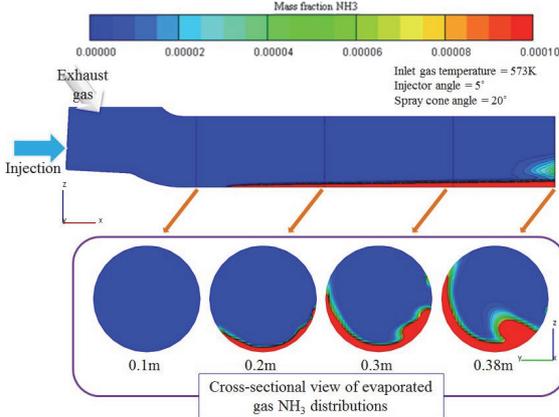
(b) Spray propagation and streaklines

Fig. 4 Cross-sectional view of the velocity vector, spray distribution, and streaklines in the exhaust pipe. ($t = 0.7$ s): (a) Velocity vector distributions, (b) Spray propagation (droplets are colored with water fraction) and streaklines

NH₃ 농도 분포를 나타낸 것이다. Fig. 5(a)에서 573 K 온도를 가지는 배기가스에 398 K(125 °C)온도 우레아 수용액이 분사되면, 열에너지를 필요로 하는 우레아 수용액 열분해 반응에 의해서 배기가스 온도는 약 550 K까지 감소하고, 특히 인젝터 부근 온도는 560 K까지 급격하게 감소하고 있다. 그리고 분사된 우레아 수용액은 배기관 하단에서 혼합되고 증발된다. 이때 많은 열량이 소모되기 때문에, 요소수열분해영역 거리에 따른 yz 단면에서 아랫부분 벽면부 온도가 낮게 형성됨을 확인할 수 있다. 그리고 Fig. 5(b)의 xz 단면과 yz 단면에서의 NH₃ 농도 분포를 보면, 배기관의 xz 단면에서 배기관 후단으로 갈수록 분사된 우레아가 열분해되어 우레아가 NH₃로 전환되기 때문에 NH₃ 생성량이 증가하는 것을 확인할 수 있고, Fig. 4에서 분사된 우레아 액적들이 중력에 의해 배기관 아랫부분에 주로 분포되어 요소수열반응을 통해 NH₃가 생성되고 있음을 알 수 있다. 그리고 Fig. 5(a)의 배기관에서 활발한 반응으로 소모된 열량이 많은 부분인 온도가 낮은 아랫면에 NH₃가 분포하고 있는 것을 확인할 수 있다.



(a) Exhaust gas temperature distributions



(b) NH₃ concentration distributions

Fig. 5 Cross-sectional view of exhaust gas temperature and gaseous NH₃ concentrations in the exhaust pipe. ($t = 0.7$ s): (a) Exhaust gas temperature distributions, (b) NH₃ concentration distributions

3.3 인젝터 설치 각도의 영향

Urea-SCR 시스템에서 우레아수용액 분사조건은 우레아수용액 암모니아 전환율에 상당한 영향을 미치기 때문에 인젝터 설치 각도에 따른 환원제 분포 특성에 대하여 고찰하였다. Fig. 6은 인젝터 설치 각도에 따라서 요소수 열분해영역 내 거리에 따른 배기가스 온도와 NH₃ 생성량 그리고 인젝터 설치 각도에 따른 NH₃ 균일도 지수를 나타낸 것이다. Fig. 6(a)는 요소수 열분해영역 내 위치에 따른 배기가스 온도 분포를 나타낸 것이다. 요소수 열분해영역 거리가 증가할수록 배기가스 온도가 감소하는 것을 확인할 수 있는데, 이는 고온 배기가스에 우레아수용액이 분사되면서 열에너지를 필요로 하는 흡열반응인 우레아 수용액 열분해 반응이 발생하기 때문이다. 따라서 배기가스 온도가 감소하면, 그만큼 NH₃가 생성된다는 것을 알 수 있다. 그리고 인젝터가 45°로 설치된 경

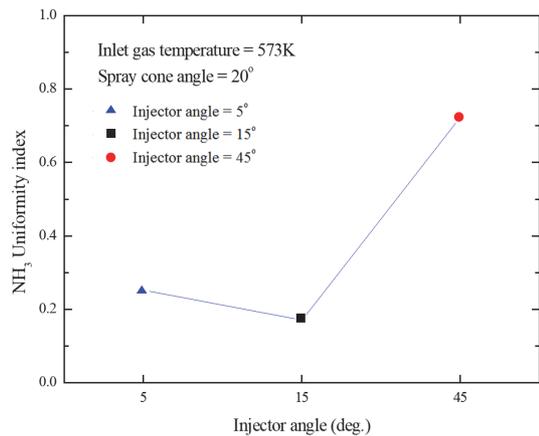
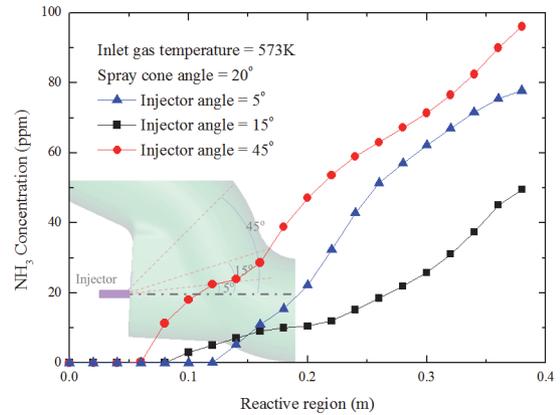
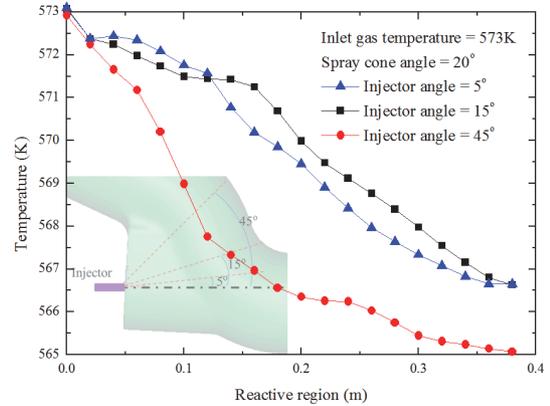


Fig. 6 Effect of injector angle with location: (a) Temperature distributions, (b) NH₃ concentration distributions, and (c) NH₃ uniformity index

우가 가장 큰 온도변화를 보이는 것을 확인할 수 있다. 또한, 0 m에서 0.14 m까지 구간에서는 배기가스 온도변화가 인젝터 설치 각도 45°, 15° 그리고 5°도 순서로 큰 것을 확인할 수 있고, 그 이후의 구간에서는 45°, 5° 그리고 15°도 순서로 배기가스 온도 변화가 큰 것을 확인할 수 있다. Fig. 6(b)는 요소수 열분해영역 내 위치에 따른

NH₃ 생성량을 나타낸 것이다. Fig. 6(a)의 결과로 미루어 볼 때, NH₃ 생성량이 45°, 5° 그리고 15°의 순으로 나타날 것이라고 예측할 수 있는데, 이러한 예측은 Fig. 6(b)를 통해 확인할 수 있다. 하지만 배기관 끝 부분에서는 5°와 15°의 배기가스 온도가 같은 것을 Fig. 6(a)에서 확인하였지만, Fig. 6(b)에서는 5°가 15°에 비해 더 많은 NH₃를 생성한다. 이는 인젝터가 15°로 설치되는 경우 우레아수용액이 충분히 증발하기 전에 배기관 벽면에 부딪쳐서 벽면 점착되는 Wall-wetting 현상이 발생하기 때문으로 판단된다. 이러한 현상으로 0.14 m 부근에서 5°와 15°의 온도와 NH₃ 생성량 우위가 역전되는 현상을 설명할 수 있다.

한편, Fig. 6(c)는 5°, 15° 그리고 45°의 인젝터 설치 각도에 따른 NH₃ 균일도 지수를 나타낸 것이다. 이전 결과인 Fig. 6(a)와 Fig. 6(b)의 결과로 미루어 볼 때, 45° 인젝터 각도가 가장 좋은 분사조건이라고 판단되며, Fig. 6(c)의 NH₃ 균일도 지수 또한 가장 높은 0.72를 보인다.

3.4 우레아 분무각도에 따른 환원제 분포 특성

Fig. 7은 인젝터 각도 5°에 대해서 우레아 분무각도에 따른 환원제 분포 특성을 고찰한 것이다. 분무각도는 Fig. 6의 내부 그림과 같이 인젝터를 기준으로 y-x 방향으로 분무되는 우레아의 분무각(x-z)이다. Fig. 7(a)는 요소수열분해영역 위치에 따른 배기가스 온도분포를 나타낸 것으로서, 우레아 분무각도가 증가함에 따라 우레아에서 NH₃로 열분해 반응이 증가하기 때문에 배기가스 열량이 반응에 소모되어 배기가스 온도가 감소하는 것을 확인할 수 있다. 이는 우레아 분무각도를 증가시키면, 배기가스와 우레아 수용액 접촉 면적이 증가하여 열분해 반응이 더 활발하게 일어나기 때문으로 사료된다. Fig. 7(b)는 NH₃ 전환율을 나타낸 것으로 암모니아 농도 변화를 나타내는 그래프이다. 20° 우레아 분무각도는 배기가스 진행방향으로 우레아수용액이 분사되기 때문에 NH₃가 0.1 m 이후에 측정되지만, 30° 그리고 40°의 경우 넓은 우레아 분무 각도에 의해서 20°에 비해 인젝터로부터 더 가까운 거리에서 NH₃가 생성되는 것을 확인할 수 있다. 한편, Fig. 7(c)의 NH₃ 균일도 지수를 보면, 20° 우레아 분무각도는 배기가스 진행 방향으로 우레아수용액이 분사되기 때문에 0.25의 낮은 균일도 지수를 갖는다. 하지만, 40°의 우레아 분사 각도는 0.6으로 상대적으로 높은 NH₃ 균일도 지수를 갖는다. 이는 인젝터 설치각도가 5°인 경우 우레아 분무각도가 증가함에 따라 배기가스와 우레아수용액 사이의 접촉면적이 증가하여 우레아수용액과 배기가스 사이 혼합에 유리하기 때문이다.

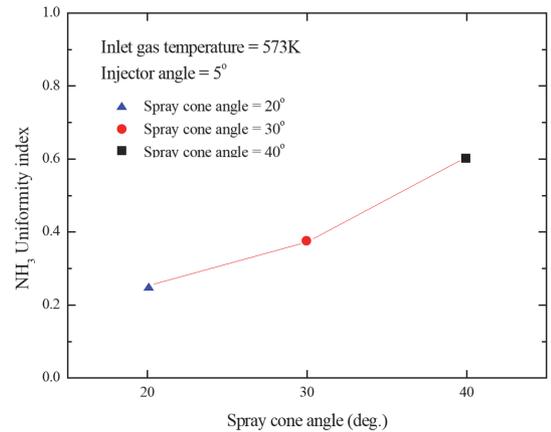
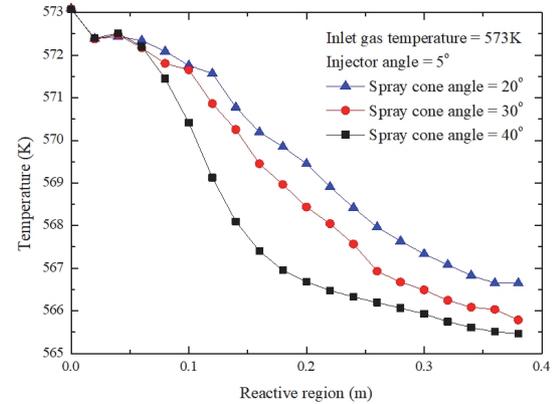
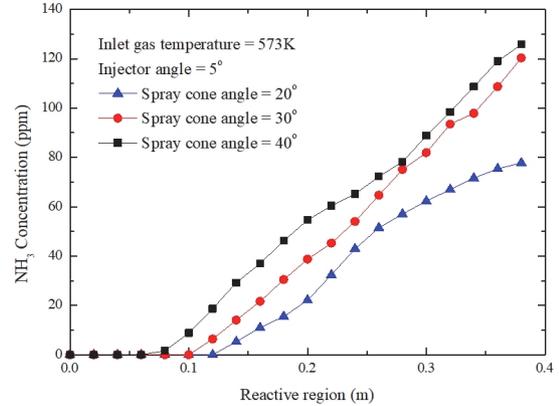


Fig. 7 Effect of spray cone angle with location: (a) Temperature distributions, (b) NH₃ concentration distributions, and (c) NH₃ uniformity index

3.5 우레아 분사량에 따른 효율 평가

Fig. 8은 인젝터 설치각도가 5°이고 우레아 분무각도가 40° 조건에서 0.1 g의 기본 우레아 분사량 80%, 100%, 120% 그리고 140%이며, 분사량은 0.08 g, 0.10 g, 0.12 g 그리고 0.14 g으로 변경하였을 때 요소수열분해영역 내 거리에 따른 배기가스 온도분포와 NH₃ 생성량과 NH₃ 균

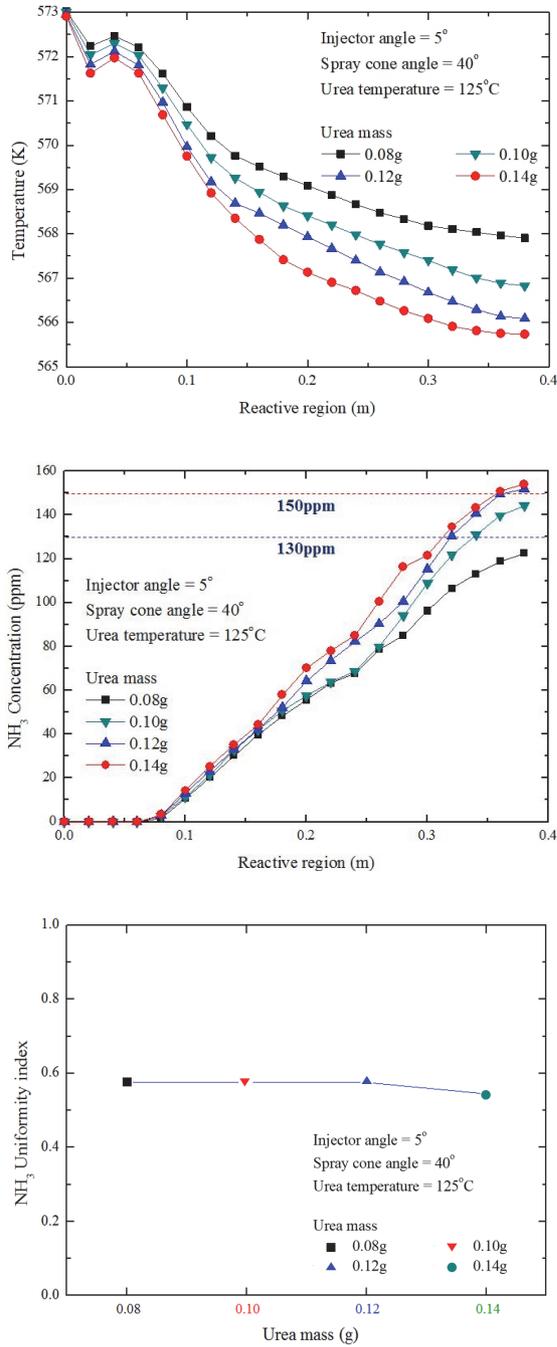


Fig. 8 Effect of urea mass injected with location: (a) Temperature distributions, (b) NH₃ concentration distributions, and (c) NH₃ uniformity index

일도 지수를 보여주고 있다. Fig. 8(a)는 요소수열분해영역 내 거리에 따른 배기가스 온도분포를 나타낸 것으로서, 우레아 수용액 흡열반응에 의해서 우레아 분사량이 적으면 배기가스 온도가 조금 감소하고, 우레아 분사량이 많으면 배기가스 온도가 많이 감소하는 것을 확인할

수 있다. 그리고 Fig. 8(b)는 요소수열분해영역 내 거리에 따른 NH₃ 생성량을 나타낸 것으로서, 우레아 분사량이 많을수록 많은 NH₃가 생성되는 것을 알 수 있다. 또한, 본 연구에서 고려한 EURO 5 2.2ℓ 디젤엔진의 NEDC 모드 주행 시험에서 요구되는 130 ppm과 150 ppm의 NH₃ 생성량을 기준으로 살펴볼 때, 우레아 분사량 0.08 g은 요소수 열분해영역인 0에서 0.38 m 구간에서 최대 122 ppm의 NH₃ 생성량으로 두 가지 기준치를 모두 만족시키지 못하고, 0.10 g의 우레아 분사량은 최대 144 ppm의 NH₃ 생성량으로 150 ppm의 기준치만 만족시키지 못했다. 하지만 0.10 g, 0.12 g 그리고 0.14 g은 각각 0.34 m, 0.32 m, 그리고 0.31 m에서 130 ppm을 만족시키고, 0.12 g 과 0.14 g의 경우 각각 0.38 m와 0.36 m에서 150 ppm을 만족시키는 것을 확인할 수 있다.

한편, Fig. 8(c)의 NH₃ 균일도 지수는 Fig. 7(c)의 우레아 분사각도에 의한 균일도 결과와 마찬가지로 거의 영향을 미치지 못하는 것을 확인할 수 있는데, 이는 분사되는 우레아수용액은 유입되는 배기가스 유량에 비해서 매우 소량이기 때문에 우레아수용액 열분해 반응에 의한 배기가스 흐름에 변화가 거의 발생하지 않기 때문으로 판단된다.

4. 결론

본 연구에서는 디젤 배기관내 분사된 우레아 수용액 증발과 혼합특성에 관한 연구를 수행하였다. 해석결과 검증 후, 인젝터 설치 각도, 우레아 분무 각도 그리고 우레아 분사량에 따른 환원제 분포 특성에 대한 연구결과를 다음과 같이 정리할 수 있다.

- 1) 배기관 내 인젝터 설치 각도는 흡열반응인 우레아 수용액의 열분해 반응에 영향을 주기 때문에, 배기가스 온도, NH₃ 생성량, 그리고 NH₃ 균일도 지수에 영향을 미친다. 본 연구에 적용된 형상에 대해서는 5°로 장치된 인젝터가 가장 적합한 것으로 판단된다.
- 2) 인젝터 설치각도가 5°인 경우 분사되는 우레아 수용액 분무각도가 증가할수록 혼합특성이 향상된다. NH₃ 균일도 지수 측면에서도 40° 분무각도는 0.6 그리고 20° 분무각도는 0.25를 나타낸다. 따라서 40° 분무각도가 20° 분무각도 대비 약 2.5배 좋은 NH₃ 균일도 지수를 갖는다.
- 3) 우레아수용액 흡열 반응으로 인해 NH₃ 변환이 활발할수록 배기가스 온도는 낮아지며, 분사량이 많을수록 NH₃가 많이 생성된다. NO_x와 NH₃는 1:1 환원 반응을 통해 NO_x를 저감하므로 130 ppm과 150 ppm의 NH₃ 생성량 목표치를 만족시킬 수 있는 우레아 분사

량을 확인할 수 있다. 분사되는 우레아 수용액은 유입되는 배기가스 유량에 비해서 매우 소량이기 때문에 우레아 수용액의 열분해 반응에 의한 NH₃ 균일도 지수에 큰 영향을 미치지 않는다.

후 기

본 연구는 2021년 정부(미래창조과학부)의 재원으로 한국연구재단의 지원(No.NRF-2021R1F1A1060964)을 받아 수행된 연구이며 이에 감사드립니다.

References

- 1) I. G. Hwang, C. L. Myung, S. S. Park, K. S. Lee and J. I. Park, "Investigation on the Flow and Spray Characteristics of Urea SCR System in Light Duty Diesel Engine to Improve NO_x Reduction Efficiency," KSAE Annual Conference Proceedings, pp.675-678, 2009.
- 2) Y. J. Choi, J. M. Woo, D. J. Kim and J. K. Lee, "Effects of the NO_x Reduction with Swirl Angle of a Twin-fluid Nozzle using Dual Supplying Air in Urea-SCR System," Proceedings of the KSME Fall Conference, Vol.9, pp.2205-2210, 2009.
- 3) S. J. Jeong, S. J. Lee and W. S. Kim, "Numerical Study on the Optimum Injection of Urea-Water Solution for SCR DeNO_x System of a Heavy-Duty Diesel Engine to Improve DeNO_x Performance and Reduce NH₃ Slip," Environmental Engineering Science, Vol.25, No.7, pp.1017-1036, 2007.
- 4) J. Y. Kim, S. H. Ryu and J. S. Ha, "Numerical Prediction on the Characteristics of Spray-Induced Mixing and Thermal Decomposition of Urea Solution in SCR System," Internal Combustion Engine Division Fall Technical Conference, Vol.37467, pp.165-170, 2004.
- 5) F. Birkhold, U. Meingast, P. Wassermann and O. Deutschmann, "Modeling and Simulation of the Injection of Urea-Water-Solution for Automotive SCR DeNO_x-Systems," Applied Catalysis B: Environmental, Vol.70, Nos.1-4, pp.119-127, 2007.
- 6) AVL FIRE™, Lagrangian Multiphase Module, Edition 10/2011, 2011.
- 7) H. Ström, A. Lundström and B. Andersson, "Choice of Urea-spray Models in CFD Simulations of Urea-SCR Systems," Chemical Engineering Journal, Vol.150, No.1, pp.69-82, 2009.
- 8) A. D. Gosman and E. Loannides, "Aspects of Computer Simulation of Liquid-fueled Combustors," Journal of Energy, Vol.7, No.6, pp.482-490, 1983.
- 9) R. J. Kee, F. M. Rupley, E. Meeks and J. A., Miller, "Chemkin III: A Fortran Chemical Kinetics Package for the Analysis of Gas-Phase Chemical and Plasma Kinetics," Technical Report SAND 96-8216, Sandia National Laboratories, 1996.
- 10) D. Kuhnke, Spray/Wall-Interaction Modelling by Dimensionless Data Analysis, Shaker, Verlag, 2004.
- 11) H. Weltens, H. Bressler, F. Terres, H. Neumaier and D. Rammoser, "Optimisation of Catalytic Converter Gas Flow Distribution by CFD Predictions," SAE 930780, 1993.
- 12) H. J. Seong, Selective Catalytic Reduction (SCR) of NO by NH₃ in a Fixed-bed Reactor, M. S. Thesis, The Pennsylvania State University, Pennsylvania, 2012.
- 13) D. Tsinoglou and G. Koltsakis, "Modeling of the Selective Catalytic NO_x Reduction in Diesel Exhaust including Ammonia Storage," Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part D: Journal of Automobile Engineering, Vol.221, No.1, pp.117-133, 2007.