

2차 분사시스템을 갖는 De-NOx 시스템의 충돌판 형상에 따른 연료의 혼합 및 증발 특성 향상을 위한 연구

박상기* · 오정모**†

* 한양대학교 기계공학과, ** 목포해양대학교 기관시스템공학부

Characteristics of Fuel Mixing and Evaporation Based on Impingement Plate Shape in a Denitrification NOx System with a Secondary Injection Unit

Sangki Park* · Jungmo Oh**†

* Department of Mechanical Engineering, Hanyang University

** Division of Marine Engineering, Mokpo National Maritime University

요 약 : 디젤엔진에서는 2차 분사 시스템은 다양한 배기 시스템에 적용이 가능하고, 엔진 제어와 관계없이 독립적으로 제어가 가능하기 때문에 환원제 희석 면에서도 후분사 또는 다른 농후한 환원제 분위기 형성 방법 등에 비해 장점이 많다. 2차 분사 시스템에서는 환원제의 공급 방법에 따라서 촉매의 효율은 달라질 수밖에 없다. 환원제는 일정압력 이상으로 유지 및 최적화가 필요하고, 인젝터의 위치 및 각도의 선정은 매우 중요한 인자이다. 본 논문에서는 2차 분사 조건을 변화시켜 환원제의 농도와 양을 변화시켰다. De-NOx 촉매 시스템에서 최대의 NOx 정화 효율에 적합한 환원제 분사 조건들의 선정이 필요하고, 분무 도달거리, 분무 평균 입경, 분무각, 분사량 등의 분무 특성과 환원제의 균일 분포를 잘 파악하여야 한다. 이와 같은 목적을 위하여 2차 분사에서 충돌판 형상에 의한 분무 및 거동 특성을 가시화 방법과 디지털 화상 처리 기법을 사용하여 분석하였으며, 충돌판 형상의 영향성과 각 형상에 대한 최적 각도 범위를 도출하였다.

핵심용어 : De-NOx, 촉매, 환원제, 벽류, 충돌판

Abstract : A secondary injection system in a diesel engine has benefits: it can be controlled independently without interrupting engine control, it can be adapted to various layouts for exhaust systems, and it pose no reductant dilution problems compared to post injection systems in the combustion chamber or other supplemental reductant injections. In a secondary injection system, the efficiency of the catalyst depends on the method of reducing the supply. The reductant needs to be maintained and optimized with constant pressure, the positions and angles of injector is a very important factor. The concentration and amount of reductant can be changed by adjusting secondary injection conditions. However, secondary injection is highly dependent upon the type of injector, injection pressure, atomization, spray technology, etc. Therefore, it is necessary to establish injection conditions the spray characteristics must be well-understood, such as spray penetration, sauter mean diameter, spray angle, injection quantity, etc. Uniform distribution of the reductant corresponding to the maximum NOx reduction in the DeNOx catalyst system must also assured. With this goal in mind, the spray characteristics and impingement plate types of a secondary injector were analyzed using visualization and digital image processing techniques.

Key Words : Denitrification NOx, Catalyst, Reductant, Wall-wetting, Impingement plate

1. 서 론

국제적으로 대기 환경 오염에 대한 규제가 강화되고 있으며, 디젤 엔진에서 발생하는 배기가스 중의 대기 환경 오염 주

요 요소인 미립자(Particulate matter, PM), 질소산화물(Nitrogen oxides, NOx)에 대해서도 단계별로 그 규제가 강화되고 있는 실정이다(Eastwood, 2000; Johnson, 2012; Lee et al., 2016). 이에 대응하기 위하여 엔진의 공통관(Common-rail), 다중분사(Multiple injection), 배기가스재순환(Exhaust gas recirculation, EGR), 가변용량과급기(Variable geometry turbocharger, VGT) 등을 적용한 연소 개선 기술과 디젤산화촉매(Diesel oxidation catalyst,

* First Author : psk3391@gmail.com, 031-418-9293

† Corresponding Author : jmoh@mmu.ac.kr, 061-240-7207

2차 분사시스템을 갖는 De-NOx 시스템의 충돌판 형상에 따른 연료의 혼합 및 증발 특성 향상을 위한 연구

DOC), 디젤여과장치(Diesel particulate filter, DPF) 등의 후처리 기술의 조합으로 그 규제에 대응하고 있으나 더욱 강화되고 있는 규제에 대응하기 위한 기술 개발이 시급하다(Yoshihara, 2005; Heywood, 1988; Ritrievi et al., 1987; Choi et al., 1998).

PM에 비해 NOx는 연소 효율이 높을수록, 고온 연소일수록 그 배출량이 증가하기 때문에 관련되는 연구가 이루어져 있으나, 이는 반대로 PM을 증가시키는 상반관계(Trade-off) 관계에 있으므로 기술의 한계에 다다르고 있다. 이에 대응하기 위하여 연소 개선 기술이 제안되고 있으나 기술 개발 수준과 비용에 비해 그 효과가 낮은 수준이다. 따라서 De-NOx 후처리시스템이 필수 불가결의 기술로 고려되고 있다.

근래의 대표적으로 효과적인 De-NOx 후처리기술은 선택적 환원촉매(Selective catalytic reduction, SCR)과 질소산화물 흡착촉매(Lean NOx trap catalyst, LNT)이 있다. SCR은 Urea 수용액을 환원제로 이용하는 Urea-SCR을 보편적으로 널리 사용되고 있다. Urea-SCR은 높은 NOx 저감 효율을 가진다. LNT는 엔진 작동 운전 영역에서 NOx를 흡착하고 환원제를 LNT에 공급하여 흡착된 NOx가 환원되어 N₂로 정화시키는 기술이다.

Urea-SCR과 HC-LNT는 환원제의 공급 방법에 따라서 촉매의 효율은 달라질 수밖에 없다. 환원제를 일정압력 이상으로 유지해야 하고 2차 분사시스템에 따라서 그에 적합한 최적화가 필요하다. 그 중 인젝터의 위치 및 각도의 선정은 매우 중요한 인자이다.

이전의 연구에서 배기가스의 흐름 방향으로 환원제를 분사하는 경우 가장 바람직한 인젝터의 위치 및 각도이었다. 그러나 배기가스의 흐름 방향으로 환원제를 분사하는 경우를 제외하고 배기관에 일정한 각으로 인젝터를 부착할 경우 배기관 내 벽류(Wall-wetting)¹⁾는 불가피하다(Oh et al., 2008).

따라서 배기관에 일정한 각으로 인젝터를 부착할 경우 벽류를 방지하고 배기가스 흐름에 최대한 영향을 주지 않으면서 효과적인 혼합 및 증발 특성을 위한 부가물 또는 장치가 필요하게 된다(Oh et al., 2012).

본 연구에서는 배기관에 일정한 각으로 인젝터를 부착할 경우 벽류를 방지하고 배기가스 흐름에 최대한 영향을 주지 않으면서 효과적인 혼합(Mixing) 및 증발(Evaporation) 특성을 위한 충돌판(Impingement plate)을 설계하였고, 충돌판의 형상 및 Plate angle에 대하여 실험을 통하여 최적 조건을 도출하였다.

2. 실험장치 및 방법

2.1 충돌판 설계 및 적용

배기가스의 유동 흐름방향으로 환원제를 분사하는 경우

1) 벽류(Wall-wetting): 연료가 벽에 부딪혀 액체로 남아 흐르는 상태

를 제외하고 일정한 각으로 인젝터를 부착할 경우 배기관 내 벽류는 불가피하다. 따라서 배기관에 일정한 각도로 인젝터를 부착하여 벽류를 방지하고 유동 흐름에 최대한 영향을 주지 않으면서 효과적인 혼합 및 증발 특성을 위한 충돌판을 설계하였다.

Fig. 1은 기초설계를 위한 배기관 내 충돌판 개념도이다. 이전 연구에서 인젝터의 마운트부에 설치하여 제작성이 양호하고 충돌판의 크기를 최적화하여 배기가스의 영향을 최소화할 수 있는 장점이 있다(Oh and Lee, 2014). 3-D CAD program을 사용하여 실제 배기관 도면에서 인젝터의 분무각과 분무에 상응하는 충돌판의 크기와 각도 및 형상을 계산하였다. 이 결과로부터 도면을 작성하여 실제 충돌판을 제작하고 수정 보완하여 적정 형상을 결정하였으며 배기모사 시스템 실험으로 충돌판의 적정 각도를 도출하였다.

충돌판 형상은 기초단계인 평판형으로부터 계단형, 스푼형, 보울형으로 진화 및 변경시켰다. Fig. 2는 충돌판 설계를 위한 제작 단계를 나타낸 것이다.

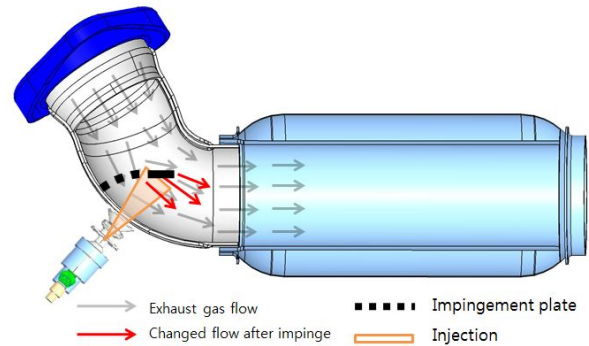


Fig. 1. Schematic diagram of the impingement plate concept inside the exhaust pipe for foundation design.

	Rich ← → Lean			
Process	Flat	Spoon	Step	Bowl
CAD				
Prototype				
Test results of visualization	30°	40°	50°	60°

Fig. 2. Production stage of the impingement plate concept.

충돌판 적용에 대한 분무 유동을 가시화하기 위하여 배기모사 시스템에 장치를 설치하였다. Fig. 3은 배기모사시스템과 분무 가시화 시험 장치를 나타낸 그림이다. 고속카메라와 제논 램프를 이용하여 관의 측면 유동 패턴을 가시화하였고, Nd:YVO₄ portable laser로 sheet beam을 형성하여 배기관

내의 환원제에 대한 단면 분포 패턴을 가시화하였다. 단면의 측정 위치는 충돌판 삽입 위치로부터 100 mm 지점이다. 시험연료는 디젤 인젝터 시험 및 평가 연료인 Castol社의 ISO4113을 사용하였다.

본 실험 조건은 Table 1에 나타내었다. 충돌판이 있는 경우는 공기온도에 의한 벽류 영향을 알아보기로 공기온도를 50, 100, 200, 300°C로 실험하였으며, 충돌판이 없는 경우는 200°C 이상에서 많은 양이 기화되어 이미지로 충돌판의 비교가 어려워서 50, 100°C의 조건만을 선정하였다.

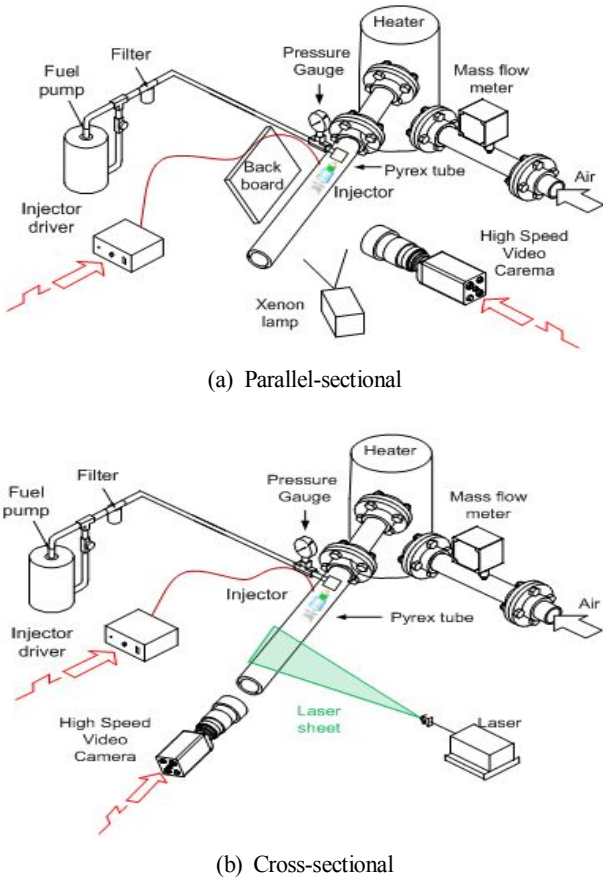


Fig. 3. Spray visualization systems in the exhaust pipe flow.

Table 1. Experimental conditions of spray visualization for the impingement plate

Parameter	Condition
Fuel pressure (P_{inj})	3.8 bar
Fuel type	Castrol, ISO 4113
Injection duration time (D_{inj})	10 ms
Air flow (Q_{air})	20, 30, 40, 50 g/s
Air temperature (T_{air})	50, 100, 200, 300°C
Visualization conditions	10,000 fps, 90us exposure

3. 결과 및 고찰

3.1 충돌판의 적용 없는 영향 및 가시화 결과

충돌판의 각도에 대한 영향을 파악하기 위하여 충돌판을 부착하지 않은 상태에서 배기가스의 유량과 온도에 대한 배기관 내의 분무 패턴의 변화를 가시화 하였다.

Fig. 4는 곡관에서 충돌판을 적용하지 않고 인젝터를 수직으로 부착하였을 경우의 배기관의 측면 분무 패턴의 Root mean square(RMS) 이미지이다. 벽류 발생이 뚜렷하게 나타나는 것을 확인할 수 있고, 공기 유량이 증가할수록 분무는 부채꼴 형태로 휘어지면서 넓게 분산되고, 공기 온도가 증가함에 따라 액적의 기화량이 증가하여 벽류량도 적어지고, 액주로부터의 액적 분산이 더 넓어졌다.

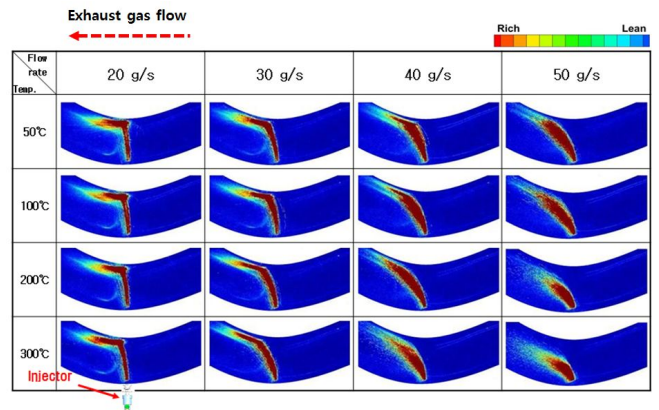


Fig. 4. RMS images of the spray parallel sectional patterns in the curved exhaust pipe.

Fig. 5은 인젝터 팁에서의 거리를 100 mm에서 배기관 내의 유동 단면을 가시화한 결과이다. 공기유량과 온도가 증가할수록 환원제의 분포 영역이 넓어지지만 배기관 내에 충돌되면서 일정한 패턴을 보이지 않고 공기유량과 온도에 따라 한쪽으로 치우치는 현상을 보였다.

분무 형상의 변화를 정량화하기 위하여 RMS 이미지 처리 결과로부터 Fig. 6(a)에 나타난 정의와 같이, 분무확산 각도와 인젝터 팁에서 벽류위치에 따른 거리를 측정하였다. Fig. 6(b)는 공기 온도와 공기유량의 변화에 따른 분무확산 각도의 변화를 나타낸 그래프이다. 공기온도와 공기유량의 증가에 따라 액적의 산란과 기화가 진행됨으로써 분무확산 각도가 커지는 결과를 보였고, 공기유량이 20 g/s, 공기온도가 50°C와 100°C에서는 배기관 내의 충돌로 인하여 분무확산 각도가 크게 나타났다.

2차 분사시스템을 갖는 De-NOx 시스템의 충돌판 형상에 따른 연료의 혼합 및 증발 특성 향상을 위한 연구

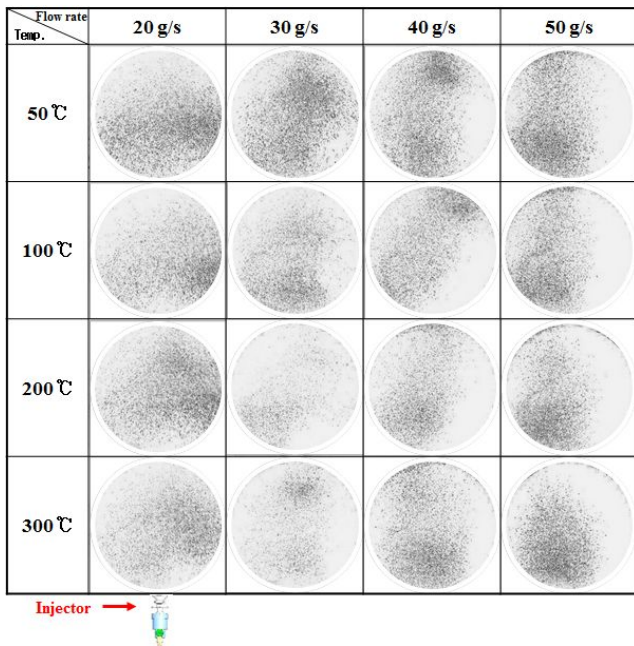
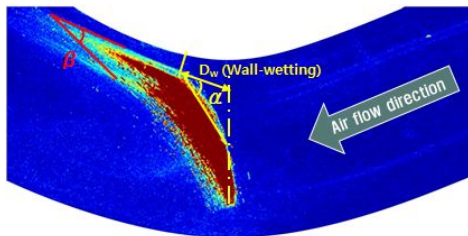
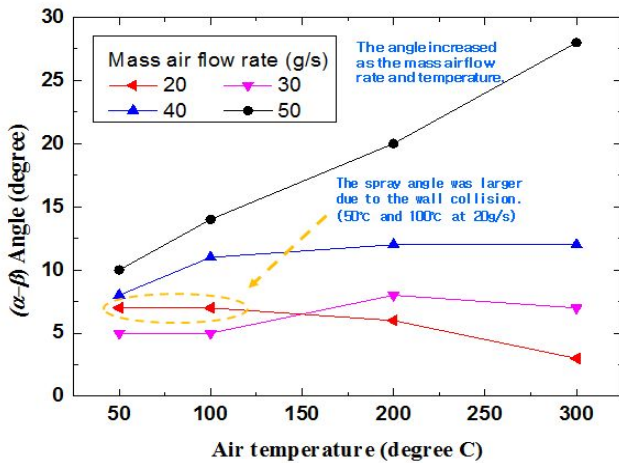


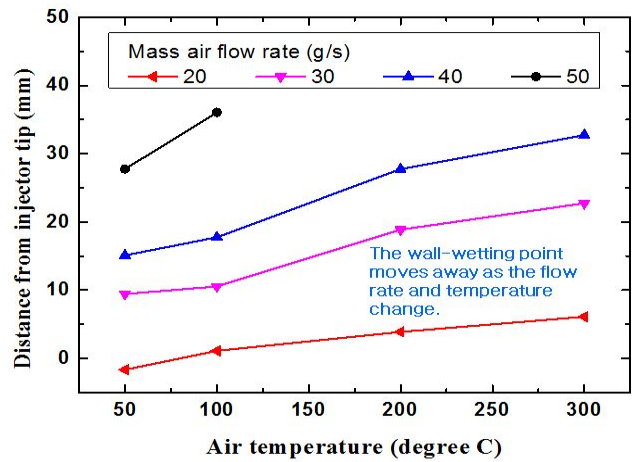
Fig. 5. Spray cross-sectional patterns in the curved exhaust pipe.



(a) Definition of the parameter



(b) Dispersion angle



(c) Wall-wetting position

Fig. 6. Variation of the spray dispersion angle and wall-wetting distance from the injector tip in the curved exhaust pipe.

Fig. 6(c)는 공기온도와 공기유량의 변화에 따른 벽류위치에 대한 거리를 측정된 그래프이다. 공기유량과 공기온도의 증가에 따라 벽류위치가 멀어지는 경향을 보였고, 공기온도 100°C와 200°C 사이에서는 공기유량이 증가함에 따른 벽류 거리의 변화폭이 크게 나타났다. 이는 공기온도의 증가에 따라 액적이 기화되고 액적밀도의 감소로 인하여 분무 속도가 공기유속보다 작아지기 때문이다.

또한, 고유량, 고온일수록 벽류량이 작아지고 분무 진행방향이 배기관 중심 방향으로 치우치는 결과를 나타냈다. 공기유량 50 g/s, 공기온도 300°C에서는 분무 진행 방향이 배기관 내에서 거의 중심 방향으로 변화되었다. 이 조건에서 환원제를 분사한다면 충돌판이 없어도 무방하겠지만, 현실적으로는 전체적인 공기유량과 공기온도의 다양한 조건을 만족시켜야 한다. 따라서 분무확산 각도의 변화를 만족시킬 수 있는 충돌판의 형상과 각도의 설계가 필요하다.

3.2 충돌판의 적용 영향 및 가시화 결과

충돌판 설계 과정으로 충돌판을 제작하였지만, 실제 유동 패턴에서는 설계에 의한 예측과 다르게 공기 유속 및 온도에 의하여 유동패턴이 현격하게 변화되었다. Fig. 7은 곡관에 수직으로 인젝터를 부착했을 경우에 평판형과 스폰형의 충돌판을 적용한 결과로써 모사 배기관의 측면 유동 가시화에서 획득한 이미지를 평균 RMS 한 것이다.

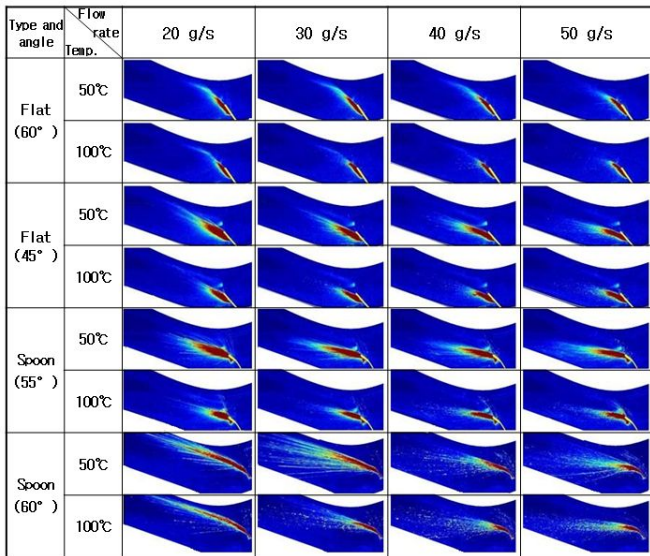


Fig. 7. RMS images of the spray parallel sectional patterns for the Flat and Spoon type in the curved exhaust pipe.

기초 실험 결과 평판형은 충돌판에 분무 줄기가 충돌 후 충돌판 면을 따라 흘러나가는 특징을 보였고, 따라서 충돌판의 형상에 의존하여 분무진행 방향이 결정됨을 확인하였다.

반면, 스푼형은 충돌 후 스푼 형상에 의해 분무줄기가 보다 넓게 분산되었고, 따라서 적절한 충돌판 각도와 스푼의 곡률이 중요함을 알 수 있었다.

초기 설계로서는 평판형은 60°가 적절하였고 스푼형은 55°가 적절하였다. 그러나 실제 배기관에 적용하였을 때 평판형 60°는 배기관 내의 유동장의 중심에서 위쪽으로 치우치는 결과를 보였고, 이러한 치우치는 각도를 보정하기 위하여 45°로 변경하였다. 그 결과 거의 배기관 중심 부근에 분사가 분포되는 결과를 얻었다.

따라서 곡관에 인젝터를 수직으로 부착하였을 경우에 평판형은 45° 정도가 최적 충돌판 각도이다. 이와 같은 방법으로 스푼형은 Fig. 7에서 알 수 있는 바와 같이 60°의 충돌판 각도를 유추하였다.

Fig. 8은 각 조건에서 100 mm 지점의 모사 배기관 내부 단면 분포를 나타낸 것이다. 평판형 60°는 실험 조건에서 제외하였고, 평판형 45°는 배기관의 단면에 대하여 전체적으로 환원제가 균일한 분포를 보였다. 스푼형 55°는 Fig. 7의 배기관의 측면 유동 패턴의 결과에서 예상할 수 있는 바와 같이 배기관의 단면의 중심에서 아래쪽으로 치우치는 결과를 보였고, 스푼형 60°는 평판형 45°와 유사하게 균일한 분포를 보였다. 그러나 분무 패턴에서 알 수 있듯이 스푼형이 평판형보다 입자의 크기가 더 작게 나타났다.

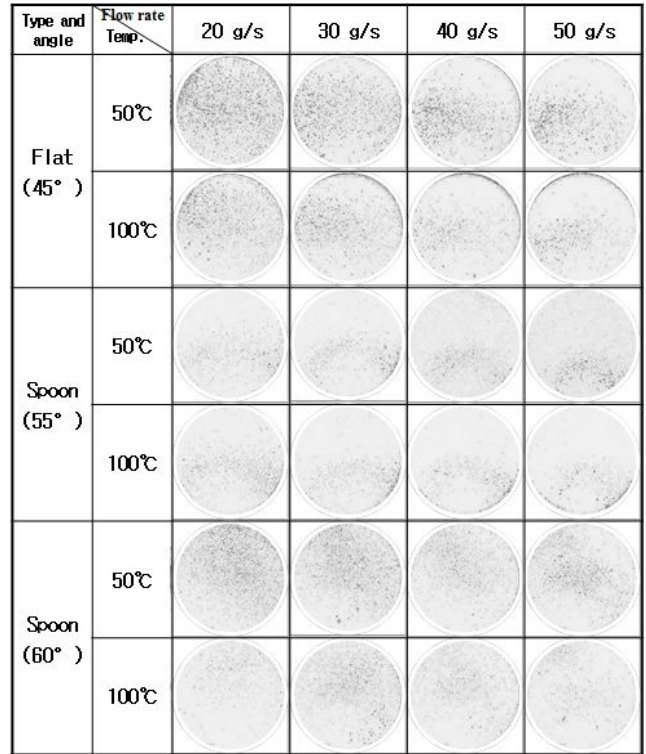


Fig. 8. Spray cross-sectional patterns at 100 mm from the injector tip for the Flat and Spoon type in the curved exhaust pipe.

곡관에서 계단형과 보울형에 대하여 비교하였으나 평판형과 스푼형에 비해 입자의 크기가 작게 나타나 낮은 영향도를 보였다. 게다가 직관에서 인젝터를 45°로 부착했을 경우에도 비슷한 결과를 보였다. 따라서 환원제 인젝터의 각 부착위치와 각도에 대하여 위와 동일한 방법으로 비교하였다.

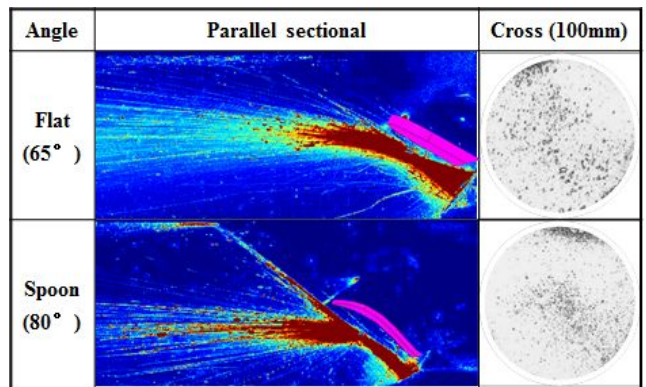


Fig. 9. Comparison of the optimum plate type and plate angle for attached injector angle 45 degrees in the straight exhaust pipe.

2차 분사시스템을 갖는 De-NOx 시스템의 충돌판 형상에 따른 연료의 혼합 및 증발 특성 향상을 위한 연구

Fig. 9와 같이 직관에서 인젝터를 45°로 부착했을 경우, 충돌판의 각도는 평판형이 약 65°, 스푼형이 약 80°에서 가장 양호한 결과를 보였고, 곡관에 수직으로 인젝터를 부착하였을 경우와 다르게 평판형이 더 양호한 반대의 결과를 보였다. 다만, 두 경우 모두 스푼형은 충돌판 각도를 평판형 보다 더 크게 해야 됨을 알 수 있었다.

Fig. 10과 같이 직관에서 인젝터를 수직으로 부착했을 경우, 각 충돌판 종류에 따라 모두 적절한 각도를 유지할 경우 적용이 가능함을 알 수 있었고, 계단형과 보울형이 액적 분포 균질도 면에서 더 좋은 결과를 나타냈다.

종합적인 적용 영향성에 대한 결과는 평판형 < 스푼형 < 보울형 < 계단형 순이다. 그러나 보울형은 제작성이 불리할 것으로 예상되고, 인젝터 부착 길이, 즉, 인젝터 팁으로부터 충돌판까지의 거리가 길어질수록 충돌판과의 거리가 멀어지고, 분사단면 면적이 커지므로 충돌판의 크기는 변경되어야 할 것으로 예상된다.

따라서 실제 배기관에 적합한 충돌판 형상을 최적화하기 위해서는 환원제를 균일하게 분포할 수 있는 인젝터의 위치를 먼저 설정하고, 그에 적합한 충돌판의 크기와 형상을 결정해야 할 것이다.

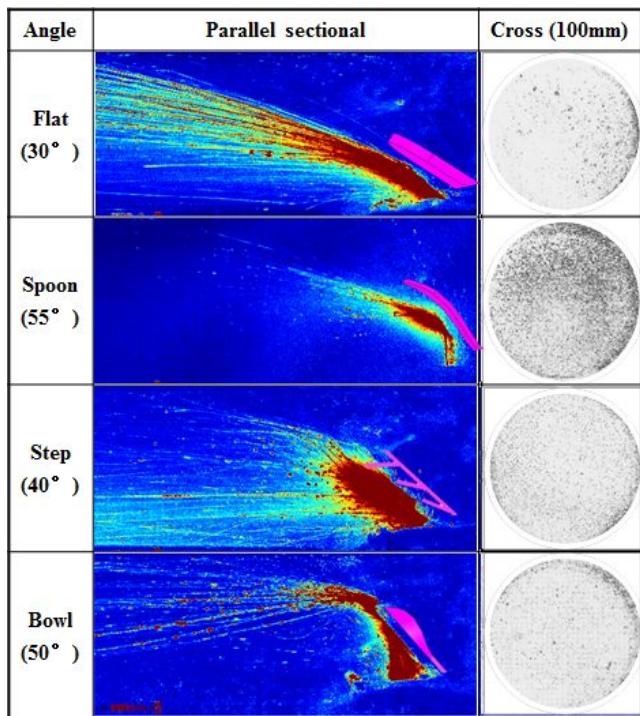


Fig. 10. Comparison of the optimum plate type and plate angle for attached injector angle 90 degrees in the straight exhaust pipe.

곡관과 직관에서 인젝터의 부착각도 및 충돌판 종류와 각도에 대하여 취득한 이미지로부터 일정한 변화를 분석하기 위하여 Fig. 11과 같이 정의한 분산각과 관 중심에 대한 각도를 측정하였다.

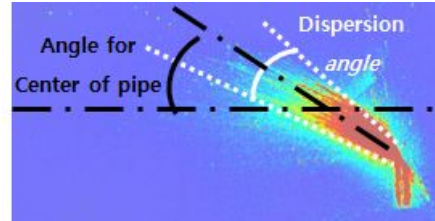


Fig. 11. Definitions of the dispersion angle and the angle for center line of pipe.

Fig. 12는 충돌판 종류에 따른 분산각의 변화를 측정한 결과이다. 공기유량이 증가할수록 분산각은 거의 선형적으로 감소하는 경향을 보였다. 측정한 분산각 결과와 취득한 이미지를 상호 비교하였을 경우, 그래프에 표시한 15~30°의 분산각이 최적의 범위임을 도출하였다.

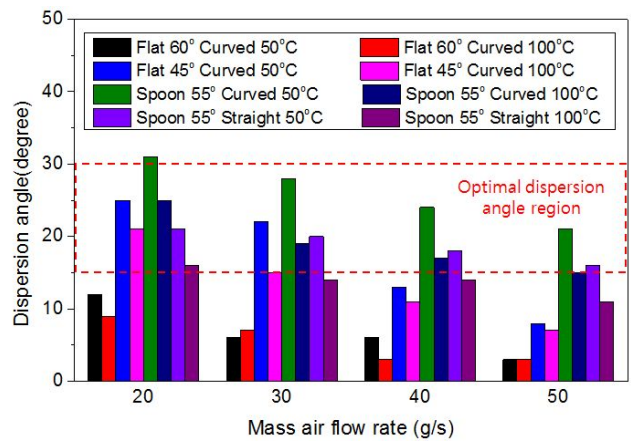


Fig. 12. Comparison of the dispersion angle for various impingement plate types.

Fig. 13은 배기관의 중심선에 대한 분사중심의 각도 변화를 측정한 결과이다. 인젝터를 곡관에 수직으로 부착 시 평판형 60°의 경우 벽류가 전반에 걸쳐 형성되었고, 따라서 벽류 범위를 설정하였다.

각 조건에서의 결과들과 취득한 이미지를 비교 분석하였을 경우 -5~+15°의 최적의 범위를 설정하였고, 이 최적범위 내에서 도시된 적색선과 같이 최상의 충돌판 설계에 필요한 예측 값을 도출할 수 있었다.

이러한 특수한 인젝터의 부착위치 및 각도 환경에서 이와 같은 충돌판을 최적 범위 또는 예측값에 적합하게 설계하여 사용한다면, 촉매의 NOx 감소 효율에 항상 매우 큰 긍정적인 영향을 미칠 것이다.

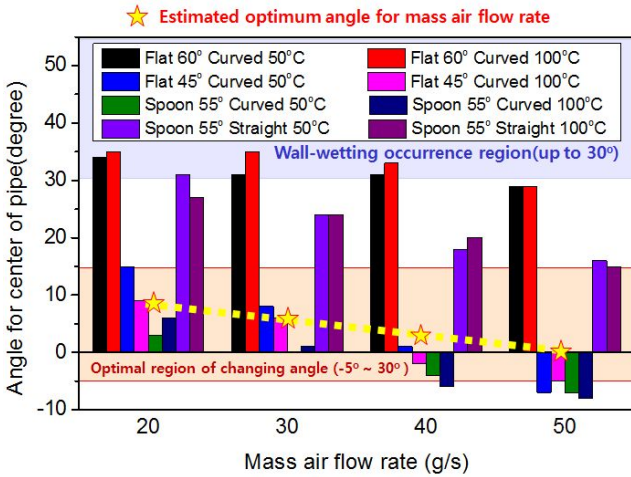


Fig. 13. Comparison of the angle for center line at various impingement plate types.

4. 결론

인젝터의 부착위치 및 각도 환경에서 다양한 종류의 충돌판에 대해서 모사배기 시스템을 활용하여 분사 특성을 평가하였고, 형상에 따른 충돌판의 영향성을 평가하여 최적설계 변수를 도출하였으며, 아래와 같은 결과를 얻었다.

- (1) 배기관에 일정한 각도로 인젝터를 부착 할 경우 배기가스 유동에 영향을 최소화 하면서 분무특성을 변화시킬 수 있는 충돌판의 설계가 가능하다.
- (2) 설계한 각 충돌판 종류 모두 적절한 각도를 유지할 경우 적용이 가능하고, 종합적인 적용 영향성에 대한 결과는 평판형 < 스푼형 < 보울형 < 계단형 순이다.
- (3) 인젝터 부착 길이가 길어질수록 충돌판과의 거리가 멀어지고, 분무면적이 커지므로 충돌판의 크기는 변경되어야 할 것으로 예상되므로, 실제 배기관에 적합한 충돌판 형상을 최적화하기 위해서는 인젝터의 부착 길이를 먼저 설정하고, 그에 적합한 충돌판의 크기와 형상을 결정해야 한다.
- (4) 분산각 결과와 취득한 이미지를 상호 비교하였을 경우, 분산각의 최적범위는 15~30°이다.
- (5) 각 조건에서의 결과들과 취득한 이미지를 비교 분석하였을 경우, 다양한 각도에서 최적범위는 -5~+15°이고, 이

최적범위 내에서 최상의 충돌판 설계에 필요한 예측값을 도출할 수 있었다.

- (6) 인젝터의 부착 위치 및 각도 환경에서 충돌판을 최적범위 및 예측값에 적합하게 설계하여 사용한다면, 환원 촉매의 NOx 저감 효율에 항상 매우 큰 긍정적인 영향을 미칠 것이다.

후 기

이 논문은 2015년도 정부(교육부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 기초연구사업임.

(No. NRF-2015R1D1A3A01019661)

References

- [1] Choi, J. S., K. H. Cho, H. J. Jeon, H. K. Jin and Y. S. Lim(1998), An Investigation on the Performance of De-NOx System for Marine Diesel Engines, The Korean society for marine environment & energy, pp. 135-140.
- [2] Eastwood, P.(2000), Critical topics in exhaust gas aftertreatment, Research Studies Press, Baldock, Hertfordshire, England, Philadelphia, pp. 1-405.
- [3] Heywood, J. B.(1988), Internal combustion engine fundamentals, McGraw-Hill, New York, pp. 1-930.
- [4] Johnson, T. V.(2012), Vehicular Emissions in Review, SAE Int. J. Engines, Vol. 5, No. 2, pp. 216-234.
- [5] Lee, W., S. Jang, S. Kim, M. Kang, K. Chun, K. Cho, S. Yoon and J. Choi(2016), Experimental Study on Structure Characteristics of Particulate Matter emitted from Ship at Various Sampling Conditions, Journal of the Korean Society of Marine Environment & Safety, Vol. 22, pp. 547-553.
- [6] Oh, J., K. Kim and K. Lee(2012), Effect of various mixer types on the spatial distribution of a De-NOx reductant, Fuel, Vol. 94, pp. 93-101.
- [7] Oh, J. and K. Lee(2014), Spray characteristics of a urea solution injector and optimal mixer location to improve droplet uniformity and NOx conversion efficiency for selective catalytic reduction, Fuel, Vol. 119, pp. 90-97.
- [8] Oh, J., K. Lee and J. Lee(2008), A study on the Optimal Injection Conditions for an HC-LNT Catalyst System with a 12-Hole Type Injector, Journal of Thermal Science and Technology, Vol. 3, No. 2, pp. 278-291.
- [9] Ritrievi, K. E., J. P. Longwell and A. F. Sarofim(1987), The effects of ferrocene addition on soot particle inception and

2차 분사시스템을 갖는 De-NOx 시스템의 충돌관 형상에 따른 연료의 혼합 및 증발 특성 향상을 위한 연구

growth in premixed ethylene flames, Combustion and Flame,
Vol. 70, No. 1, pp. 17-31

- [10] Yoshihara, Y.(2005), Diesel Combustion: Formation of Nitrogen Oxides, Journal of Society of Automotive Engineers of Japan, Vol. 59, No. 4, pp. 70-74.

Received : 2016. 10. 24.

Revised : 2016. 12. 13.

Accepted : 2016. 12. 28.