

## SECFR 시스템의 차량적용을 위한 분무균일도향상에 관한 연구

손정욱\* · 우승철\* · 김수겸\* · 이기형†

### A Study for Improving Spray Uniformity of the SECFR System for Vehicle Applications

J. W. Shon, S. C. Woo, S. G. Kim and K. H. Lee

**Key Words:** Fouling(찌꺼기오염물), Steam soot remover(증기 수트 제거장치), Droplet uniformity index(액적균일도), Droplet area ratio(액적분포면적율)

#### Abstract

Lower recirculated gas temperature at EGR system reduces NO<sub>x</sub> and PM emissions. However, EGR Cooler can be polluted by PM generated from recirculated EGR gas, and it reduces cooling efficiency and the amount of EGR gas simultaneously. The SECFR(Steam EGR Cooler Fouling Remover) system which uses the evaporated washer fluid steam caused by high temperature of EGR gas was manufactured for removing fouling generated on the cooler surface. Since an injection pressure of wind shield washer fluid in the vehicle is approximately 0.5 bar, it is not enough to atomize the injected washer fluid. Thus, it is necessary to apply a method to atomize the washer fluid. In this study, the impinging plate was used to promote the atomization of spray washer fluid for the purpose of apply SECFR system to vehicles and measured the DAR(Droplet Area Ratio) and DUI(Droplet Uniformity Index) through the spray visualization.

#### 기호설명

EGR : 배기가스재순환  
NO<sub>x</sub> : 질소산화물  
PM : 입자상 물질  
HC : 미연 탄화수소  
CO : 일산화탄소  
DUI : 액적균일도  
DAR : 액적분포면적율

#### 1. 서 론

최근 배출가스규제가 강화됨에 따라 차량에 장착된 엔진은 NO<sub>x</sub>, HC, CO와 PM 등과 같은 유해물질 배출량을 감소시켜야 한다. 그 중 디젤엔진에서 가장 많이 배출되는 NO<sub>x</sub>의 감소를 위해 일반적으로 EGR 시스템을 장착하고 있다.

EGR 시스템의 재순환 되는 가스의 온도가 낮을수록 엔진은 NO<sub>x</sub> 및 PM 배출량이 감소한다<sup>(1)</sup>. 하지만, EGR 가스를 냉각하는 쿨러는 재순환 가스의 PM으로 인하여 fouling현상이 발생하고, 이 현상으로 인하여 냉각효율이 낮아져 EGR가스가 냉각이 되지 않고 공급되거나, 쿨러의 가스공급관이 막혀 EGR가스 공급량이 감소하여 EGR시스템의 성능이 감소한다<sup>(2)</sup>. 이와 같은 fouling으로 인한 단점을 극복하기 위하여 본 연구에서는 foul-

Received: 30 Apr 2015, Received in revised form: 14 Jun 2015, Accepted: 15 Jun 2015)

\*한양대학교 대학원

†책임저자, 회원, 한양대학교 기계공학부

E-mail : hylee@hanyang.ac.kr

TEL : (031)400-5251 FAX : (031)400-4064

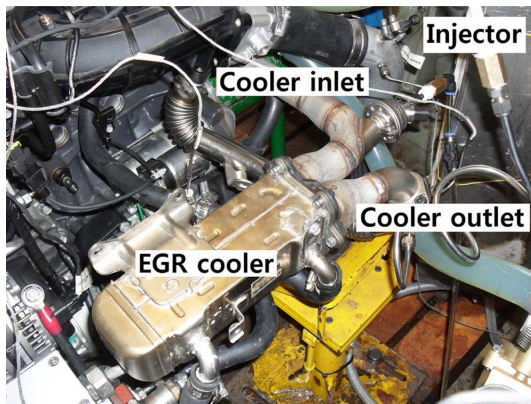


Fig. 1 Photograph of SECFR system

ing을 제거하는 시스템을 고안하였다.

엔진에서 발생하는 배기가스 내부에는 HC, NO<sub>x</sub>, PM 및 미량의 엔진오일 등이 포함되어 있으며, 이로 인하여 EGR시스템의 내부표면에 fouling이 발생한다. 이런 fouling은 기본적으로 소수성을 가진다. 하지만 이러한 소수성은 HC가 흡착되면 친수성으로 변화되어 물을 흡수 할 수 있게 된다<sup>(3)</sup>. fouling이 물을 흡수하여 포화상태가 된 후, 물이 증발할 때 fouling이 생성된 표면에서 떨어져 나오게 된다<sup>(4)</sup>. 워셔액은 메탄올과 물의 혼합물로써, HC와 물을 동시에 가지고 있기 때문에 위의 이론에 적합한 성질을 가진다. 하지만, 직접적으로 워셔액을 분사하여 열교환기에 충돌시킬 경우, 열충격으로 인하여 열교환기의 내구성이 낮아짐으로, 스팀의 형태로 열교환기에 공급하는 것이 바람직하다<sup>(5)</sup>.

EGR 쿨러 내부의 fouling을 제거하기 위하여 Fig. 1과 같이 일반적으로 차량에 모두 탑재되어 있는 워셔액을 주기적으로 EGR쿨러 입구에 분사하고, 고온의 EGR가스로 인해 증발한 워셔액 스팀이 쿨러 표면의 fouling을 제거하는 SECFR(Steam EGR Cooler Fouling Remover) 시스템을 제작하였다<sup>(6)</sup>.

분사량 및 분사시기 제어를 위해 사용된 인젝터는 배기가스의 온도를 견디기 위하여 UREA-SCR용 2차 분사 인젝터를 사용하였다.

본 연구에서는 차량에 SECFR시스템을 적용하기 위하여 분사된 워셔액의 무화를 촉진하는 충돌판을 이용하여 워셔액을 충돌판에 직접 분사하고 분무 가시화를 통하여 DAR(Droplet Area Ratio) 및 DUI(Droplet Uniformity Index)를 측정하였다.

## 2. 실험장치 및 실험방법

### 2.1 인젝터 분사각도 측정장치

인젝터에서 분사된 워셔액이 배기관에 충돌하지 않고 EGR쿨러에 도달하기 위한 인젝터 부착위치 및 EGR 가스 공급관 길이를 찾기 위하여 Fig. 2와 같은 장치로 분사각도를 측정하였다. 이때 분사압력은 차량의 워셔액 분사 압력인 0.5 bar를 적용하였다.

취득한 이미지는 MATLAB을 이용하여 분무도 달거리와 분무각도를 계산하여 도출하였다. 분무도달거리는 인젝터에서 분사된 액적이 증발하지 않고 도달하는 거리를 말하며, 분무각도는 인젝터에서 분사된 액적이 이루는 각도를 뜻한다. 측정된 분무도달거리와 분사각은 분사된 액적이 wall wetting 현상을 보이지 않도록 EGR쿨러에 직접적으로 액적이 충돌하지 않으면서 관내벽에도 충돌하지 않는 장착위치를 선정할 수 있는 정보이다.

### 2.2 인젝터 액적균일도 측정장치

분사각과 분무도달거리를 이용하여 결정된 인젝터 분무 액적 측정위치의 액적균일도를 측정하기 위하여

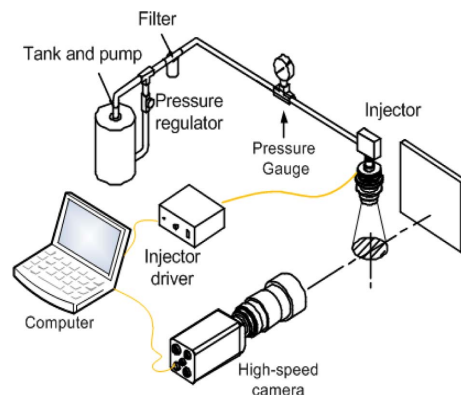


Fig. 2 Spray angle and penetration measuring system

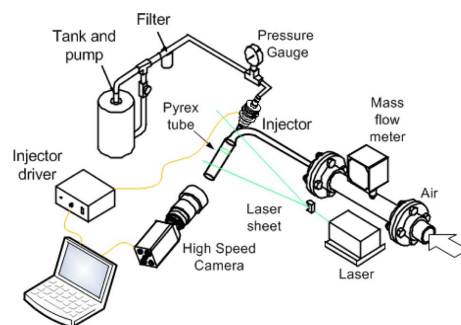


Fig. 3 Spray cross-sectional pattern measuring system

Fig. 3과 같이 측정위치에 투명한 파이프 유리관을 장착하였다. 측정위치에 포터블 레이저를 이용하여 시트빔을 형성하고 단면의 분무입자가 스캐터링 된 이미지를 고속카메라로 촬영하였다<sup>(7,8)</sup>. 전체 유동관은 Fig. 1의 실차시스템과 동일한 직경과 길이로 제작되었다.

EGR클러 내부와 같이 고온의 조건일 경우 워셔액이 일부 증발하여 액적균일도 측정에 어려움이 있어 공급하는 공기는 25°C를 유지하였다. 공기 공급량은 공급관 내 유동장으로 인한 영향성을 그대로 모사하기 위하여 실제 EGR가스 공급량과 같은 45.24 kg/h로 공급하였다. 이 공급량은 대상차량엔진의 2000 rpm BMEP 8bar에서의 EGR가스 공급유량과 같다.

인젝터는 50 ms로 구동하였고 1회 워셔액 분사량은 약 40 mg이다.

액적 균일도 및 분포면적율을 계산하기 위하여 고속 카메라로 취득한 단면 이미지들을 모두 누적시켜 RMS 이미지로 변환하였다.

정량적인 균일도와 면적을 계산하기 위하여 분사기간 전체에 대한 모든 화상을 RMS방법이 적용된 이미지를 gray scale로 변환후, 픽셀단위로 메쉬그리드를 적용하여 식 (1)을 이용하여 액적을 흰색과 검정색으로 이진화 처리한 이미지를 식 (2)를 통하여 DAR를 계산하였다. 이때 thresholding level값을 0.1이하로 적용하여 산란된 모든 액적을 합산하였다.

$$S_i(x,y) = \sum_{k=1}^n S_k(x,y) > T \quad (1)$$

$S_i$  : Cumulative image of each image frames after the thresholding

$T$  : Thresholding level

$$DAR = \frac{SP_1}{SP_T} \times 100(\%) \quad (2)$$

$SP_1$  : Total number of white pixels of  $S_i(x, y)$

$SP_T$  : Total number of pixels

또한, DUI를 계산하기 위하여 UI를 계산하는 식 (3)을 이진화된 이미지의 메쉬그리드에 맞게 식 (4)와 같이 변환하여 이용하였다<sup>(9)</sup>.

$$UI = 1 - \sum_{i=1}^n \frac{|v_i - \bar{v}|}{2\bar{v}S_a} S_i \quad (3)$$

UI = Uniformity index

$v_i$  = Local flow velocity at cell  $i$

$\bar{v}$  = Average flow velocity at the cross section

$S_a$  = Cross section area of a monolith

$S_i$  = Section area of cell  $i$ .

$$DUI = 1 - \sum_{(x,y)} \frac{|i(x,y) - \bar{i}|}{2\bar{i}SP_T} SP(x,y) \quad (4)$$

DUI = Droplet uniformity index

$i(x,y)$  = Intensity value at pixel  $(x, y)$

$\bar{i}$  = Averaged intensity value of all of the pixels

$SP(x, y)$  = Each pixel  $(x, y)$  of the cumulative image  $SI(x,y)$

$SP_T$  = Total number of pixels.

### 2.3 분무액적 충돌판

워셔액은 EGR클러 전단의 90° 곡관에서 EGR클러를 바라보는 방향으로 분사된다. 이 위치에서는 곡관의 바깥쪽을 따라서 유동이 집중되며, 이 때문에 워셔액 액적은 유동장의 영향으로 방향이 꺾이게 된다.

Fig. 4는 직접 워셔액 액적을 충돌시켜 미립화 하기 위한 충돌판을 나타낸다. 곡관의 유동장의 난류강도를 높이면서 동시에 액적이 직접적으로 돌하여 미립화를 촉진시키는 목적으로 제작되었다.

충돌판의 방향은 곡관의 유동방향과 각 날개가 서로 90°로 교차되도록 장착하였으며, 인젝터 분사위치로부터 약 50 mm 떨어진 EGR가스 공급관의 곡관부가 끝나는 지점에 장착하였다.



Fig 4. Spray droplet breaker plate

### 3. 실험 결과 및 고찰

#### 3.1 인젝터 분사각 측정결과

Fig. 5는 취득된 분사각 이미지이다. 0.5 bar 50 ms로 분사한 결과 분사각은 약 12°이며, 분무도달거리는 측정 범위를 벗어났다. 이는 수직으로 장착된 인젝터에서 분사된 액적이 거의 미립화되지 않은 채로 그대로 촬영구간을 지나쳤기 때문이다.

EGR쿨러의 입구의 사각형 단면에서 좁은 변의길이는 26 mm이며, 분무각으로 형성되는 삼각형 형상의 액적의 폭이 26 mm보다 좁아지는 분무길이는 110 mm이다. 이를 통하여 인젝터는 최소 EGR쿨러 입구로부터 110 mm 이하로 떨어진 거리에 장착해야 한다는 사실을 알 수 있었다.

#### 3.2 액적 균일도 및 분포면적을 측정 결과

EGR쿨러에 균일한 액적이 공급되는 지 확인하기 위하여 인젝터로부터 약 90 mm 떨어진 거리에서 시트빔을 이용하여 분무 이미지를 취득하였다

##### 3.2.1 충돌판 미적용 분무 측정 결과

Fig. 6는 충돌판을 적용하지 않은 상태의 분무 액적 RMS 이미지 이다. 전체 화면에서 직선으로 분사되는 액적이 공기유동에 의하여 한쪽방향으로 조금 이동한

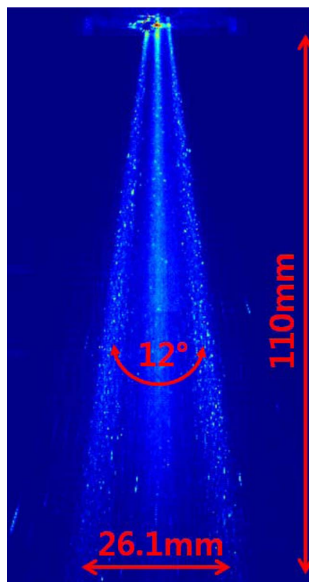


Fig 5. Spray angle and injection distance at EGR cooler inlet

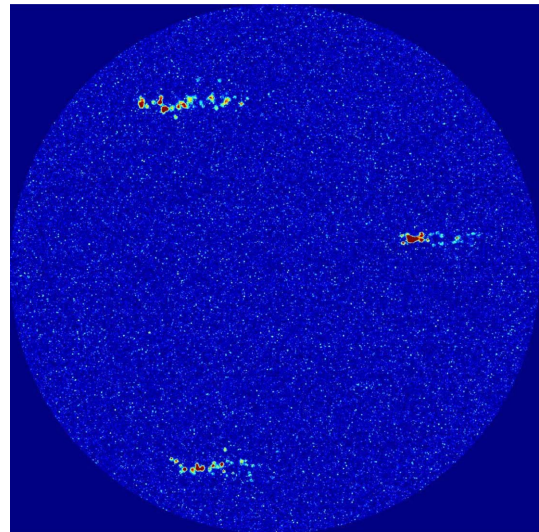


Fig. 6 Spray pattern RMS image of unapplied spray droplet breaker plate

것 외에는 거의 미립화가 진행되지 않았다. 이진화 이미지를 통하여 측정된 DAR은 0.38%이며, DUI값은 0.04로 액적 분포 및 균일도가 매우 낮은 것을 알 수 있다.

이는 차량의 워셔액 시스템 분사압력이 약 0.5 bar 정도로 인젝터의 적정분사압력인 4 bar에 턱없이 부족한 압력을 가지기 때문에 분사 시 워셔액이 무화되지 않고 분사되는 현상이 발생하였기 때문이다.

무화가 이루어지지 않은 워셔액이 분사되는 경우, EGR쿨러에 접촉하기 전에 충분히 스팀이 발생하지 못하여 고온의 EGR쿨러 표면에 차가운 워셔액이 다량으로 충돌하여 열충격을 가함으로서 쿨러의 용접부 내구성을 감소시키는 현상이 발생하기 때문에 반드시 해결하여야 하는 문제이다<sup>(5)</sup>.

##### 3.2.2 충돌판 적용 분무 측정 결과

Fig. 7은 충돌판을 적용한 분무액적 RMS 이미지이다. Fig. 6과는 다르게 분사된 액적이 충돌판에 충돌함과 동시에 충돌판으로 인해 발생하는 와류로 인해 액적이 분포한 면적이 증가하였음을 알 수 있다. 관내 단면에 액적이 넓게 분포 될수록 액적분포면적율이 상승하게 된다. 하지만 전체 관에서 왼쪽으로 분포가 치우치는 결과를 보임과 동시에 액적이 잘게 쪼개지지 못하고 큰 액적이 다량으로 존재하는 결과를 보였다.

위와 같은 결과를 보이는 이유는, 이미지를 기준으로 공기기는 좌측에서 우측으로 흐르며 이 때문에 곡관부를



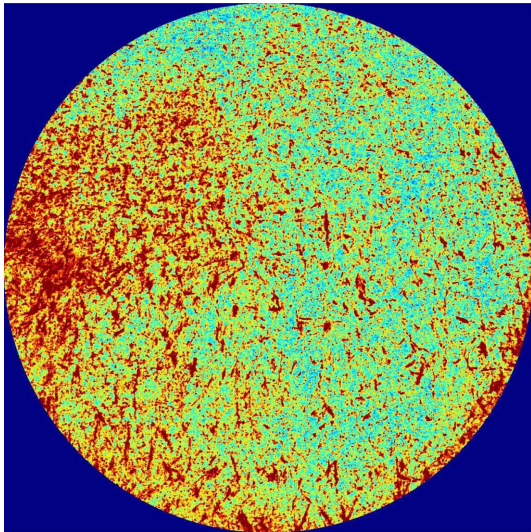


Fig. 7 Spray pattern RMS image of applied spray droplet breaker plate

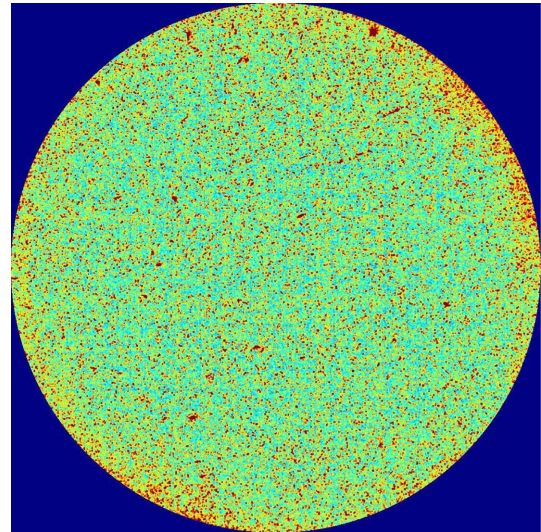


Fig. 8 Spray pattern RMS image of applied spray droplet breaker plate at 246°C hot air supply

지난 후 사진 중심을 기준으로 우측과 좌측의 유동속도가 다르기 때문이다. 또한, 충돌판의 날개가 이미지 기준 세로 방향으로 세워져 있고, 인젝터의 분무 액적도 좌측부에 두 개, 우측부에 한 개로 나누어져있다. 게다가 상온의 공기의 온도로는 워셔액이 충돌판에 충돌할 때 증발하지 못하고 wall wetting 현상이 발생하기 때문에, 충돌판을 따라 흐르는 워셔액 막이 충돌판 끝에서 큰 액적으로 모여 떨어져 나가는 결과를 보였다. 위와 같은 이유로 인하여 EGR쿨러 입구측에 공급되는 워셔액이 한쪽으로 치우쳐서 공급될 것을 예상할 수 있다<sup>(10)</sup>.

이진화 이미지로 측정된 DAR은 47.9%로 전체 단면에서 절반가까이 액적이 산란되었음을 알 수 있다. 이때 DUI값은 0.69로 균일도가 매우 향상되었다.

### 3.2.3 가열 공기 공급 충돌판 적용 분무 측정 결과

Fig. 7의 이미지를 보면 액적이 매우 뭉쳐있으며, 이로 인해 액적의 크기가 일정하지 않다는 것을 알 수 있다. EGR쿨러의 fouling을 제거하기 위한 스팀을 공급하기 위해서는 워셔액이 최대한 많이 증발하여야 하고, 이를 위해서는 미립화가 최대한 많이 되어야 한다.

실제 EGR쿨러와 같은 조건으로 가열된 충돌판으로 인하여 액적이 산란됨과 동시에 wall wetting 없도록 증발을 촉진시키기 위하여 EGR가스량 45.24 kg/h 조건의 가스온도인 246°C로 공기를 가열하여 공급하고, 충돌판이 충분히 가열된 후 워셔액을 분사하여 이미지를 취득

하였다.

취득한 이미지는 Fig. 8과 같으며, 커다란 액적이 거의 다 사라지고 매우 균일하게 워셔액이 공급됨을 알 수 있다. 이때 DAR은 55.65%이며, DUI값은 0.79로 액적분포면적과 균일도가 모두 향상되었음을 알 수 있다.

위와 같은 결과를 볼 때, 워셔액은 EGR가스로 인해 충돌판이 충분히 가열된 상태에서 분사되어야 함을 알 수 있다.

### 3.2.4 각 조건의 실험 결과 비교

Fig. 9는 각 조건의 DAR과 DUI값을 비교한 결과이다.

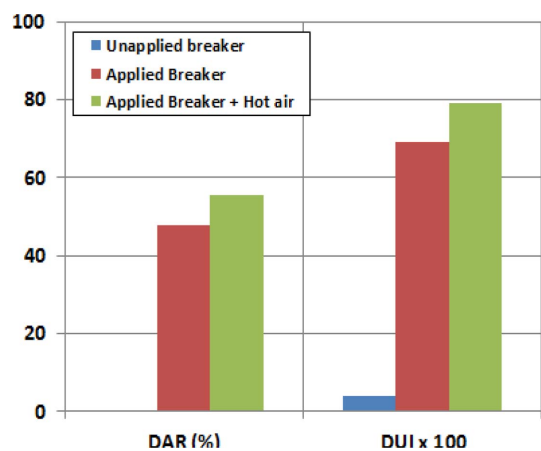


Fig. 9 Comparison of each condition

충돌판을 장착하여 분사하는 경우 DAR은 약 99.2% 개선되었고 DUI는 약 94.2% 개선되었다.

위 결과로 볼 때, 분사압력이 매우 낮은 분사시스템에서는 충돌판이 필수이다. 하지만 충돌판을 장착할 경우 차압으로 인하여 유량이 감소하거나 fouling으로 인하여 EGR가스 공급이 방해받는 등의 단점이 예측되기 때문에 충돌판에 대한 연구가 추가적으로 필요할 것으로 보인다.

워셔액을 가열된 공기에 분사하는 경우와 실온의 공기에 분사하는 경우를 비교하여도 DAR이 약 13.9%, DUI가 약 12.7% 개선되는데 이는 워셔액의 성분과 관련이 있다.

차량에 사용되는 워셔액은 물, 메탄올, 계면활성제, 부식방지제로 이루어져 있으며 일반적인 사계절용 워셔액의 경우 메탄올이 약 30~40%, 물이 약 40~50% 정도의 비율로 함유되어 있다. 이는 겨울철에도 워셔액이 얼지 않고 유지되어야 함과 동시에 창문을 닦은 후 빠르게 증발하도록 하기 위해서이다. 이러한 특성으로 인하여 가열된 공기에 분사할 경우 미립화율이 낮아도 높은 균일도를 보인다.

#### 4. 결 론

디젤엔진의 EGR쿨러 fouling을 제거하기 위하여 SECFR장치를 차량에 장착함에 있어서 분사압력 부족으로 인해 발생하는 분무 불균일 현상을 해결하기 위하여 충돌판을 부착하여 분무거동을 관찰하고 DAR과 DUI를 계산하여 개선정도를 파악하였다. 이러한 연구를 통하여 다음과 같은 결론을 도출 하였다.

(1) 가열된 EGR쿨러의 열충격으로 인한 내구성 감소를 막기 위함과 동시에 Wall wetting 현상을 방지하기 위하여 직접적인 액적이 접촉하지 않도록 인젝터 장착 위치를 선정해야 한다.

(2) 분사 압력이 매우 낮아 미립화가 되지 않는 분사 시스템에서는 충돌판 설치로 미립화를 시켜야 한다.

(3) 분사 액적 충돌판을 설치한 조건이 하지 않는 조건보다 관내 단면의 DAR이 약 99.2% DUI가 약 94.2% 개선되었다.

(4) 유동장의 온도를 246°C로 가열한 상태에서 분사할 경우 워셔액에 포함된 메탄올로 인해 발생하는 높은 증발 특성으로 인하여 미립화가 촉진되어 DAR과 DUI가 각각 13.9%, 12.7% 개선되었다.

#### 참고문헌

- (1) K. W. Choi, B. H. Moon, K. B. Kim and K. H. Lee, "A Study on the Combustion Characteristics by EGR Gas Temperature in Diesel Engine", The 41th KOSCO symposium, 2010, pp. 355~359.
- (2) Y. W. Nam, K. C. Oh, C. H. Lee, C. B. Lee and W. N. Lee, "The Effect of Cooling Efficiency on Fouling by EGR Cooler Internal Shape", Transaction of KSAE, Vol. 19, No. 1, 2011, pp. 110~108.
- (3) A. Wary, A. S. Bika, D. Long, S. Balestrino and P. Szymkiewicz, "Influence of water vapor condensation on exhaust gas recirculation cooler fouling", International Journal of Heat and Mass Transfer, Vol. 65, pp. 807~816, October 2013.
- (4) M. Glensvig, C. Stowe and E. Schutting, "Method for active EGR cooler refreshing during cold start", Vehicle Thermal Management Systems Conference Proceedings (VTMS11), Coventry Technocentre, UK, 15~16 May 2013.
- (5) L. Remy, "Thermal-Mechanical Fatigue (Including Thermal Shock)", [www.ewp.rpi.edu/hartford/.../Thermal%20Mechanical%20Fatigue.pdf](http://www.ewp.rpi.edu/hartford/.../Thermal%20Mechanical%20Fatigue.pdf)
- (6) GM global technology operations LLC, "Method and Apparatus to Recover Exhaust Gas Recirculation Coolers", US Patent 2014/0020362 A1, Jan. 23, 2014.
- (7) Joo, K., Jo, J., Kim, C., Lee, J. et al., "The Study of NOx Reduction using Urea-SCR System with CPF and DOC for Light Duty Vehicle; the Diesel NOx Reduction System", SAE Technical Paper 2008-01-1183, 2008, doi:10.4271/2008-01-1183.
- (8) Ottaviani, E., Jean, E., Albert, H., Amon, B. et al., "Dual Line Exhaust Design Optimisation to Maximize SCR Catalyst Efficiency thru Improved Ammonia Distribution", SAE Technical Paper 2009-01-0914, 2009, doi:10.4271/2009-01-0914.
- (9) Weltens, H., Bressler, H., Terres, F., Neumaier, H. et al., "Optimisation of Catalytic Converter Gas Flow Distribution by CFD Prediction", SAE Technical Paper 930780, 1993, doi:10.4271/930780.
- (10) S. Y. Kim, K. H. Lee and C. S. Lee, "Experimental Investigation on the Breakup Characteristics of Various Fuels in air Cross-flow Condition", Journal of ILASS-KOREA, Vol. 12, No. 3, 2007.