LP SCR 반응기 내 유동 균일도 개선을 위한 해석적 연구

엄형식*† · 김건호** · 김대희* · 김규종* · 김정래*

Numerical Analysis for the Flow Uniformity in the LP-SCR Reactor

Hyung Sik Um*† , Gun Ho Kim**, Dae Hee Kim*, Kyu Jong Kim*, Jung Rae Kim*

ABSTRACT

In the low pressure selective catalytic reduction (LP SCR) system, the uniformity of both ammonia concentration and exhaust gas flow at the SCR catalyst layer are important design factor for the efficient SCR-deNOx performance. According to the shape of the guide vane and static mixer, numerical simulations were conducted to analyze flow patterns and finally to find out the appropriate alternative for uniform flow at the front of catalyst in the real scale LP SCR reactor. The variations of gas velocity and ammonia concentration were quantitatively evaluated. Based on the present results, the shape was devised to satisfy the design criteria.

Key Words : Low pressure selective catalytic reduction (LP SCR), Uniform flow, Shape design, Guide vane, Static mixer

지구 온난화와 대기 오염에 따른 환경 문제가 대두되면서 선박의 배기가스에 대한 규제가 점점 강화되고 있다. 2016 년부터 적용되는 International Maritime Organization(IMO) Tier 3 규제에 따르면, 새로 생산되는 선박(Keel Laying기준)은 Emission Control Area(ECA) 로 지정된 지역에서 질소 산화물을 약 3.4 g/kWh 이하로 배출해야만 한다.[1] 이러한 규제에 대응하기 위해 선박 관련 업체들은 질소산화물을 저감하는 배기 후처리 장치의 연구 개발에 노력 중이다.

엔진 업체에서는 선박 엔진의 배기 후처리를 위해 질소산화물의 환원제로 Urea를 이용한 SCR(Selective Catalytic Reduction, 선택적 환원 촉매기술)시스템이 개발되고 있다. 이러한 SCR시스템은 우레아 수용액을 고온의 배기가스 안에 분사하여 열분해 시키고, 생성된 암모니아 가스를 질소산화물과 함께 SCR 촉매에 통과시켜 질소 산화물을 환원시키는 방식으로, 점점 엄격해지는 질소 산화물 규제에 대응할 유력한 배기가스 후처리 기술로 각광받고 있다. [2]

선박의 SCR System은 설치 위치에 따라 분류할 수 있는데, 엔진에서 배출된 고압의 배기가스를 Turbo Charger로 유입되기 이전에 바로 정화하는 HP(High Pressure) SCR System과 Turbo Charger 후단의 저압의 배기가스를 이용하는 LP(Low Pressure) SCR System으로 분류된다. 엔진의 Gas Receiver 와 Turbo Charger 사이에 위치해야 하는 HP SCR System은 부피가 큰 SCR 반응기가 필요로 한 대형 엔진에는 설치공간의 제약으로 적용하기 어렵다. 이에 비해 LP SCR System은 Turbocharger 후단에 위치하여 상대적으로 공간의 활용이 용이하여 대형 선박에 적용이 가능한 장점이 있다.

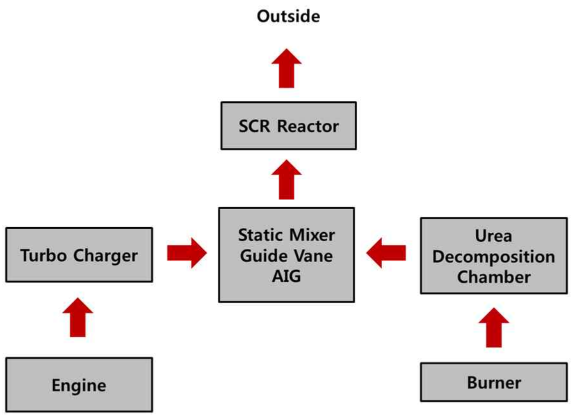

Fig 1 현대중공업 LP SCR 시스템

Fig 1은 현대중공업의 LP SCR System을 나타낸다. Turbo Charger 후단의 낮은 온도의 배기가스를 활용하여 질소산화물을 제거하기 때문에, 배기가스가 반응기를 통과하기 전에 SCR

* 현대중공업 중앙기술원 열유체 연구실
** 현대중공업 엔진사업부 박용기계종합기술부
† 연락저자, uhs010@hhi.co.kr
TEL : (052)203-8594 FAX : (052)-202-3461

촉매 활성 온도까지 온도를 상승시켜야 촉매의 질소산화물 저감성능을 기대할 수 있다. 이러한 LP-SCR 설비의 안정적인 성능을 위해서는 Turbocharger 후단과 배기구 사이의 짧은 길이의 배관에서 저온의 배기가스와 고온의 승온가스, 암모니아 가스가 적절히 혼합되어 SCR Reactor로 균일하게 유입될 수 있도록 설계하는 기술이 필요하다. SCR에서 유동 및 농도 균일화를 위한 장치의 설계 및 모델링은 이전 여러 연구들에서 수행된바 있다.[3] 현대 중공업의 LP SCR 시스템은 기존의 SCR 시스템에 비해 파이프의 직경이 크고 암모니아 분사 이후 유동 진행거리가 짧아 가스들의 혼합이 더욱 엄격한 설계 기술이 요구된다.

이번 연구에서는, 이러한 가스들의 혼합과 촉매전단의 유동균일화를 위해 기존에 고안된 Static Mixer 및 Guide Vane 을 적용하여, CFD를 이용한 방법으로 목표로 한 유속 및 농도 균일도를 만족시키는 설계안을 도출하였고, 성능을 확인하였다. 해석 프로그램은 FVM(Finite Volume Method)을 적용한 열유동 해석 상용툴인 ANSYS Fluent 15.0을 사용하고. 지배방정식으로 Continuity, Momentum, Energy, Species Equation을 적용하였다. 격자는 ICEM CFD를 이용하여 약 420만개의 Tetrahedral 격자를 구성하였고, Fluent 의 Polyhedral 기능을 활용하여 약 100만개의 Polyhedral 격자로 해석을 진행하였다.

Table 1 SCR 운전 유량 조건

Load [%]		Mass Flow [kg/s]	Temp [K]
100	Exhaust	118.34	547.64
	AIG	4.1	577
20	Exhaust	32.94	490.7
	AIG	5.38	726

Table 2 SCR 유량 조성

Load [%]		Mass Fraction [wt%]				
		N_2	O_2	CO_2	H_2O	NH_3
100	Exhaust	0.73	0.17	0.07	0.03	0
	AIG	0.61	0.15	0.13	0.04	0.07
20	Exhaust	0.73	0.17	0.07	0.03	0
	AIG	0.61	0.15	0.13	0.04	0.07

선행되어 수행된 열정산 연구로 엔진 부하 별 SCR 운전 유량 및 온도조건을 도출하였다. 유동의 Residence time이 가장 짧을 것으로 예상되는 100% 부하 조건에서 유동 균일도를 만족하는 형상을 선정한 다음, 농도 균일도 측면에서 가장 불리할 것으로 판단되는 20% 부하 조건에서 해석을 진행하여 도출 형상의 적절성을 판단하였다. 도출된 경계조건은 Table 1에 표시하였다. 예상되는 엔진 배기가스의 조성은 Table 2 에 표시하였다.

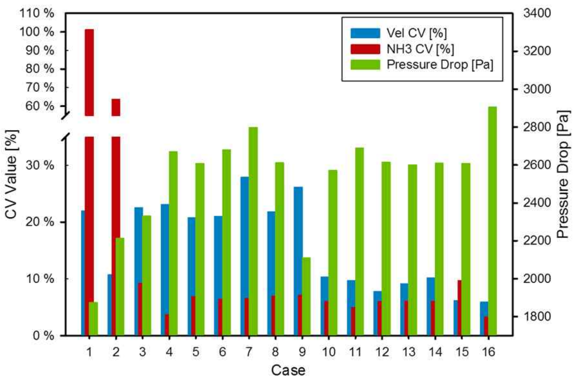

Fig 2 해석결과

연구를 통해 요구되는 유동 및 농도 균일도를 만족시키는 Static Mixer와 Guide Vane의 구성을 찾았다. 형상의 변수로는 Guide Vane 각도, 높이, 간격, Static Mixer의 위치 및 개수, 간격, AIG 이후의 유동 거리 등을 선정하여 형상을 수정하였다.

SCR 촉매 전단의 유동 균일도를 정량적으로 평가하기 위하여 Coefficient of Variation (CV) 값을 이용하였다. CV 값은 다음과 같은 방법으로 도출 할 수 있다.

$$CV = \frac{\alpha}{\bar{x}} 100\%$$

$$\alpha = \sqrt{\frac{1}{(n-1)} \sum_{i=1}^{n} (x_o - \bar{x})^2}$$

$$\bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^{n} x_i$$

α = standard deviation
$\bar{x}$ = arithmetic mean

해석 결과 도출한 유속 및 농도 균일도, 압력강하량은 Fig 2 에 그래프로 정리하였다. 이번 연구를 통해 SCR 전단 유동 균일도를 위한 적절한 설계안을 도출 할 수 있었다. 해석적으로 도출된 설계안은 추후 실험을 통해 검증 보완된 후 실제 제품에 적용될 예정이다.

본 해석은 LP SCR Mixer의 설계 방향을 설정하기 위해 수행 되었으며, 추후 실제 제작될 SCR 의 형상과는 차이 있을 수 있다.

참고 문헌

[1] http://www.imo.org/en/OurWork/Environment/PollutionPrevention/AirPollution/Pages/Nitrogen-oxides-(NOx)-%e2%80%93-Regulation-13.aspx

[2] G. C. Kim, M. H. Park, J. K. Yoon et al, “A study for optimal design of the AIG to improve the performance of deNOx acilities installed in combined cycle plant,” Journal of the Society of Airconditioning and Refrigerating Engineers of korea, vol. 19, no. 12, 2007, pp. 811-820

[3] Guanyu Zheng, Guenter Palmer, Gabriel Salanta and Adam Kotrba ‘Mixer development for urea SCR applications’, SAE Technical Paper, 2009,

[4] Chemineer, Kenics: Static Mixing Technology, Chemineer Inc., 1998, Bulletin 800 (commercial documentation)

[5] W.J. Gretta, C.R. Smith, The flow structure and statistics of a passive mixing tab, J. Fluids Eng. 115(1993) 255-263