



가야호 SCR 시스템의 온도 분포에 대한 수치 해석 Numerical Analysis for Temperature Distributions of SCR in Kaya Ship

윤지원* · 쉬펑런* · 정석호**†

Ji-Won Yoon*, Feng-Ren Xu* and Suk-Ho Jung**†

(Received 05 September 2018, Revision received 09 January 2019, Accepted 09 January 2019)

Abstract: In previous research, analysis of flow characteristics and design of optimal shape were performed in order to install SCR system on the No. 1 generator engine of the Kaya Training Ship of Pukyong National University. That result of numerical analysis was not reflected exactly on experimental data of the temperature because the temperature was assumed constant and injection and evaporation of urea was supplied to reduction reaction of nitrogen oxides as reducing agent. In this study, modeling of injection and evaporation of urea and chemical reaction about reduction reaction of nitrogen oxides are added. The results of numerical analysis compared with experimental data for temperature distributions are higher about 1°C at ①, 4°C at ②, 8°C at ③ and 11°C at ④, which successfully reflects the upward trend in temperature distributions inversely at ④.

Key Words : SCR System, Numerical Analysis, Temperature Distribution, Diesel Engine, NOx

1. 서 론

2016년 1월 1일부터 시행된 Tier III 질소산화물 규제는 에미션 규제 지역(ECA : Emission Control Area)을 항해하는 신조 선박에 한하여 발효되었다. 즉 ECA에서는 탈질 시스템을 가동하여야 하고 그 외 공해상에서는 Tier II를 만족하면 된다. TIERIII에서는 TIER I 대비 약 80% 감소를 목표로 하였기 때문에 엔진 자체만의 기술로는 감소량을 달성하기 어렵다. 이를 위해 탈질 시스템이

필요한데 선택적 환원 촉매(SCR : Selective Catalytic Reduction)가 가장 실현 가능한 장비로 주목받고 있다.¹⁻⁶⁾ 최근 SCR 시스템을 탑재한 선박이 등장하기 시작하고 있으나 실선에서 테스트한 연구는 미흡하며, 기존 선박에 리트로핏(Retrofit)을 실시한 연구⁷⁾가 있었다. 이 연구는 SCR 시스템을 실선에 장착하기 위한 유동해석, 최적설계 및 실험값과의 비교를 실시하였다. 그러나 유동해석에 있어서 배기가스의 유동에 따른 해석만 실시하였기 때문에 요소수의 분사에 따른

*† 정석호(ORCID:<http://orcid.org/0000-0002-6268-5864>) : 부교수, 부경대학교 기계시스템공학과

E-mail : sukhojung@pknu.ac.kr, Tel : 051-629-6198

*윤지원 : 대학원생, 부경대학교 기계시스템공학과

*쉬펑런 : 대학원생, 부경대학교 기계시스템공학과

*† Suk-Ho Jung(ORCID:<http://orcid.org/0000-0002-6268-5864>) : Associate professor, Department of Mechanical System Engineering, Pukyong National University.

E-mail : sukhojung@pknu.ac.kr, Tel : 051-629-6198

*Ji-Won Yoon : Graduate Student, Department of Mechanical System Engineering, Pukyong National University.

*Feng-Ren Xu : Graduate Student, Department of Mechanical System Engineering, Pukyong National University.

질량변화와 화학반응에 대한 고려가 없었다.

또한 부경대학교 실습선 가야호의 1번 발전기 엔진에 SCR 시스템을 장착하고 성능을 평가함에 있어 설계 전 유동특성해석, 최적형상 설계, 설치 후 유동특성 실험결과 비교를 통해 SCR 시스템의 설계 만족도를 높이기 위한 연구가 진행⁸⁾되었으나 정확한 유동현상과 온도변화에 대한 유동해석 결과를 나타내지 못했다. 본 연구에서는 유동해석에 있어 요소수의 분사 및 증발 모델을 추가하고 화학반응모델을 추가로 실시하여 SCR 시스템 내의 온도 분포에 관한 실험결과와 유사한 모델을 제시하고자 한다.

2. 수치 해석 모델

2.1 배기가스 유동 모델

앞서 설명한 것처럼 SCR 시스템의 수치 해석을 위해서는 배기가스의 유동과 요소수의 분무 및 촉매에서의 질소산화물과 암모니아의 화학 반응과 관련된 모델을 설정할 필요가 있다. 우선 배기가스의 유동과 관련된 것은 ANSYS에서 제공하는 표준 k-ε 모델을 사용하였다. 이는 선행연구⁷⁻⁸⁾에서도 사용한 모델이다.

2.2 요소수 분사 모델

SCR 시스템에 요소수를 분사하는 데 사용되는 노즐은 공기 보조 분사방식이고 요소수 분사는 이산 디스크릿 모델(DDM: Discrete Droplet Model)을 사용했다. 연속 방정식, 운동량 보존 방정식 및 에너지 보존 방정식이 중점이 되어 기상 유체의 유동을 해석했다. 또한 기상 유체의 유동에 있어서 난류 특징을 표현하기 위해서 k-ε 2차 방정식 모델을 채택했다. 요소수의 분사에는 액상 유체가 존재하므로 기체 상태의 균질류 방정식을 기초 모델하고 이에 상응하는 액상 유체를 첨가하는 방식으로 액적이 기상 유체의 유동에 미치는 영향을 반영했다.

전체 분사 과정은 오일러-라그랑주 방정식(Euler-Lagrange equation)으로 해석하였다. 오일러 방정식을 이용하여 기상 유체를 연속 매개체로

하는 기상 유동 편미분 방정식을 실시하였고 라그랑주 방정식으로는 이산 액적의 운동을 추적하였다. 액적의 모양은 완전한 구형이고 기체 상태로 변하는 동안은 형태의 변형이 생기지 않고 액적들 상호간의 영향은 무시하는 것으로 가정하였다. 이에 따라 액적의 속도는 항력과 중력의 항으로써 다음과 같이 나타낸다.⁹⁾

$$\frac{du_p}{dt} = F_D(\vec{u} - \vec{u}_p) + \frac{\vec{g}(\rho_p - \rho)}{\rho_p} + \vec{F} \quad (1)$$

여기서 \vec{F} 는 추가 가속도 항이고, $F_D(\vec{u} - \vec{u}_p)$ 는 액적 한 개당의 항력항으로 식 (2)와 같다.

$$F_D = \frac{18\mu}{\rho_p d_p^2} \frac{C_D Re}{24} \quad (2)$$

식 (1)과 (2)에서 u 는 유체의 위상속도, u_p 는 입자속도, μ 는 점도, ρ 는 밀도, ρ_p 는 입자 밀도, d_p 는 입자 지름, Re 는 레이놀즈 수를 나타낸다.

2.3 물질 수송 및 화학 반응 모델

SCR 시스템 내의 유동 매질은 배기가스와 요소수(분사 후는 주로 암모니아)이기 때문에 FLUENT에서 제공하는 물질 수송 모델을 적용하여 배기가스와 암모니아의 혼합 정도를 관찰하였다.

FLUENT의 화학 반응 모형에서는 제 i 종 성분의 대류-확산 방정식을 통해 각 그룹별로 구분된 성분의 질량 분수 Y_i 를 계산하며 식 (3)과 같다.

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho Y_i) + \nabla \cdot (\rho \vec{v} Y_i) = \nabla \cdot \vec{J}_i + R_i + S_i \quad (3)$$

여기서 R_i 는 제 i 종 성분의 순생산율(net rate of production)이다. S_i 는 i 종 성분의 순생산율이다. \vec{J}_i 는 질량확산율을 나타내며 식 (4)와 같이 표현할 수 있다.

$$\vec{J}_i = - \left(\rho D_{i,m} + \frac{\mu_t}{Sc_t} \right) \nabla Y_i \quad (4)$$

여기서 S_{c_i} 는 난류 슈미트 수(Turbulent schmidt number)이고, μ_i 는 난류 점도를 나타낸다. $D_{i,m}$ 은 혼합물 중 I번 째 성분의 확산계수를 나타낸다.

2.4 다공 매질 모델

촉매는 SCR의 핵심으로 본 연구에서는 허니콤보 형태의 촉매를 사용하였다. 허니콤보 구조를 그대로 메싱하면 격자가 커져서 상당히 시간이 소요되므로 본 연구에서는 수치 해석에 큰 영향을 미치지 않도록 촉매를 다공매질 지역으로 간략히 하였다.

다공 매질 모델은 다공 매개체로 정의되는 곳에서 경험적 가정에 근거하여 유동 저항력을 결합시켰다. 본질적으로 다공 매질 모델은 표준 Navier-Stoke 방정식에서 동적 에너지 항(Dynamic energy item)을 기준으로 하여 통로 내의 가스 유속을 계산하다. 동적 에너지 항은 Viscous loss term과 Inertia loss term을 포함한다.¹⁰⁾

$$S_i = - \left(\sum_{j=I}^3 D_{ij} \mu v_i + \sum_{j=I}^3 C_{ij} \rho |v| v_j \right) \quad (5)$$

여기서 S_i 는 운동량 방정식의 원항, C와 D는 행렬, $|v|$ 는 속도의 크기를 나타낸다. S_i 는 다공 매질 구역의 압력 경도에 영향을 주어 속도와 크기가 비례하는 압력 강하를 만들어 내므로 다공 매질에 대해 식 (6)과 같이 간략화 하여 계산하였다.

$$S_i = - \left(\frac{\mu}{\alpha} v_j + C_2 \frac{\rho}{2} |v| v_j \right) \quad (6)$$

식에서 α 는 투과 계수, C_2 는 관성 저항 계수를 나타낸다.

3. 실험장치 및 방법

3.1 SCR 시스템 입·출구 경계 조건

Fig. 1에 SCR 시스템의 모델링 도면을 나타내고 있다. Fig. 1에 표시된 1~4는 배기온도를 실측한 장소를 나타낸다. 또한 Table 1에는 4 지점의

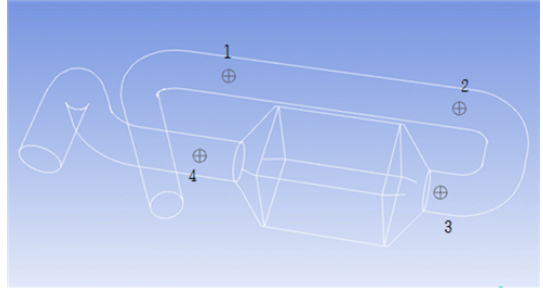


Fig. 1 Modeling of SCR system in KAYA ship

Table 1 Coordinates of modeling (unit: mm)

	X	Y	Z
1	0	-800	1950
2	0	-2600	1950
3	-800	-2600	1950
4	-800	-800	1950

좌표를 나타내고 있다. 1과 2 사이의 거리는 Y방향으로 1,800 mm이며 2와 3의 거리는 X방향으로 800 mm이다. 각 지점은 SCR 시스템 내의 변화를 확인할 수 있는 곳으로 정했다. Fig. 1에서 1 지점은 배기가스가 곡관을 지나 SCR 시스템으로 들어오는 위치이고, 2지점은 배기가스에 요소수가 분사된 이후로 곡관부의 앞에 위치한다. 즉, 1과 2 지점 사이에 요소수를 분사하는 노즐이 장착되어 있다. 3지점은 곡관을 지나 반응기에 들어가기 전의 위치이며 4지점은 반응기(촉매)를 지난 후이다.

SCR 시스템의 입구 경계조건을 확정하기 위해서는 디젤 엔진배기 가스의 질량 유량, 구성요소 그리고 기타 상관 계수가 확인되어야 한다. 가야호 발전기 디젤 엔진의 SCR 시스템 성능 실험을 160 kW의 부하일 때 실시하여 이에 맞추었다. 이때의 배기가스 온도는 340℃, 배기가스 유속은 8 m/s였다. 배기가스 내의 각 성분의 물질량 M은 이상 기체 상태의 방정식을 활용하여 배기가스의 질량을 카본 밸런스 법에 의해 계산하여 질량 비율에 따라 산정하였다. 이상의 결과를 토대로 Table 2에 배기가스의 질량분율을 나타내었고, Table 3에는 SCR 시스템의 입구 경계 조건을 각각 나타내었다.

Table 2 Components and mass fraction of exhaust gas in SCR system

Component	Mass fraction
NO	7.55×10^{-4}
H ₂ O	8.1×10^{-4}
O ₂	1.7×10^{-1}
CO ₂	4.89×10^{-2}
N ₂	6.95×10^{-1}

Table 3 Boundary conditions of entrance at SCR system

Input conditions	Value
Mass flow rate kg/s	0.3374
Outlet pressure Pa	101325
Exhaust gas temperature K	613.15
Molar mass g/mol	28.67
Exhaust gas density kg/m ³	0.597
Exhaust gas velocity m/s	8
kinematic viscosity	3.05×10^{-5}

SCR 시스템의 출구 경계 조건은 표준 대기압인 101,325 pa로 설정하였다. 그리고 벽면의 속도 경계조건을 0으로 설정하였다.

3.2 요소수 분무 조건

3.2.1 요소수의 이론 분사량

본 연구에서 사용한 요소수는 질량 농도 40%의 수용액으로 SCR 시스템 내에 분사되어 암모니아로 분리되고 암모니아가 탈질반응의 환원제로 사용이 된다. 필요한 요소수의 분사량을 구하기 위해서는 암모니아의 생성 과정, 탈질 반응과 배기가스 상관 계수를 결합하여야 한다. 또한 다음과 같은 가정이 필요하다.

- ① SCR 시스템의 반응기는 이상적인 상태로 촉매 특성을 충족한다.
- ② 반응식 (7)이 완전하게 진행되고 요소수는 모두 NH₃로 분해되어 NO_x와 반응한다.
- ③ 촉매 반응은 표준 반응에만 해당된다.

④ 질소산화물은 모두 NO로 가정한다.

디젤 엔진의 배기가스 유량과 NO_x의 배출량은 앞서 설명한 조건을 통해 구하였고 그 값은 8.49×10^{-3} mol/s이며 표준 반응을 한다는 가정을 하면 NO_x와 NH₃ 사이의 반응 계수는 1:1로 설정하였다. 따라서 필요한 암모니아 가스의 몰 유량도 8.49×10^{-3} mol/s이다. 또한 요소의 열분해와 수분해 반응으로 인해 1 mol 요소가 2 mol의 암모니아 가스를 생성하기 때문에 필요한 요소 유량은 4.245×10^{-3} mol/s이다. 요소의 몰 당 질량은 60 g/mol이고 요소수의 질량농도는 40%이므로 필요한 요소수의 질량 유량은 약 6.37×10^{-1} g/s이다.

3.2.2 요소수 분사 모델 설정

노즐의 구조와 지름은 분무 형태와 액적 지름을 결정하여 SCR 시스템의 탈질 성능에 영향을 미치기 때문에 중요한 요소이다. 일반적으로 SCR 시스템의 노즐은 배기관 중앙에 위치하고 있으며 본 연구에서도 중앙에 위치하고 있다. 노즐의 홀은 배기가스의 유동과 반대 방향으로 세팅하여 분사되도록 하였다. Table 4에 노즐의 모델링과 관련된 조건을 나타내었다.

Table 4 Boundary conditions concerned with injection nozzle of urea

Variables	Value
Position mm	Y=-1200, Z=1950
Direction	Y
Number of nozzle holes	1
hole diameter mm	0.5
Injection angle °	45
Flow rate kg/s	6.37×10^{-4}
Temperature °C	25
Velocity m/s	20

3.3 SCR 시스템의 온도 실측

Fig. 2는 가야호에 탑재된 SCR 시스템의 실물을 나타내고 있고, Fig. 3은 제어반의 컨트롤 및 모니터링 화면을 나타내고 있다. 가야호 발전기용

디젤엔진은 쌍용중공업에서 제작한 것으로 720 rpm에서 540 kW의 출력을 낸다.

Fig. 4에는 SCR 시스템의 온도를 실제 측정한 위치를 나타내고 있다. ①, ②, ③ 및 ④의 위치는 Fig. 1에서 설명한 곳과 같은 위치이다. 온도의 측정은 K-type 열전대를 각 위치에서 상중하 3곳으로 설치하여 총 12군데의 온도를 측정하였다.



Fig. 2 Picture of SCR system in Kaya ship

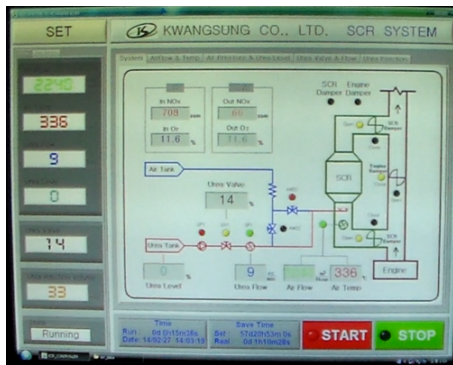


Fig. 3 Control and monitoring screen of SCR system in Kaya ship

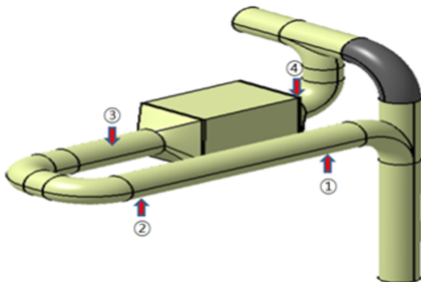


Fig. 4 Schematic diagram of experiment

온도를 측정하는 하드웨어는 National Instruments의 cDAQ-9174와 16채널 온도측정 모듈인 NI 9213을 이용하여 컴퓨터와 연결시켰다. 그리고 LabView로 계측 프로그램을 코딩하여 1초마다 각각의 온도를 측정하여 컴퓨터에 저장하였고 실습선 운항 중 약 2.5시간 동안 계측하였다.

4. 결과 및 고찰

Fig. 5와 6에는 배기관 표면 및 단면에 있어서의 온도 분포에 대한 결과를 각각 나타내고 있다. 수치해석을 실행할 때 SCR 시스템은 단열 상태로 외부와의 열 교환은 없는 것으로 가정하였다. SCR 시스템의 입구에서의 배기가스 온도는 340°C이고, 요소수의 분사가 있는 곳부터는 약 334°C 정도로 6°C가 감소하였다. 이는 요소수로부터 암모니아가 분리되는 반응들이 흡열반응이기 때문에 배기가스 온도가 감소한 것으로 추정된다. 그리고, 반응기 이후에서는 342°C로 다시 8°C가 증가하였다. 이것은 질소산화물의 환원반응들이 발열반응이기 때문에 반응기 이후에는 온도가 증가한 것으로 사료된다.

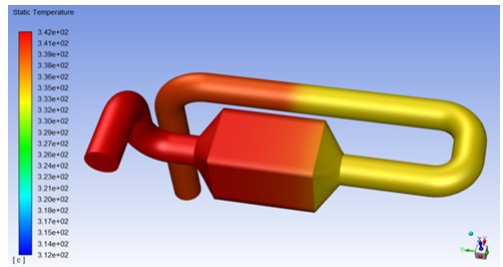


Fig. 5 Temperature distribution on surface of SCR system with reaction

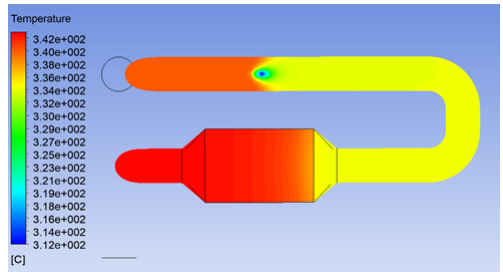


Fig. 6 Temperature distribution on cross section of SCR system with reaction

Fig. 7에는 가야호의 운항 중 발전기 SCR 시스템을 2.5시간 동안 가동하면서 실측한 온도 변화를 나타내고 있다. 선박의 발전기는 부하의 변동이 있기 때문에 일정하게 유지하기 어려우나 2.5시간 동안 4개 위치에서의 온도 변화를 측정하기에는 무리가 없었다. SCR 시스템이 비교적 정상적인 상태로 추정되는 500초 이후부터 ②의 온도는 ①에 비해 약 9°C가 낮고, ③은 ②보다 약 3°C 낮다. ④의 온도는 오히려 ③에 비해 4°C 높아졌다.

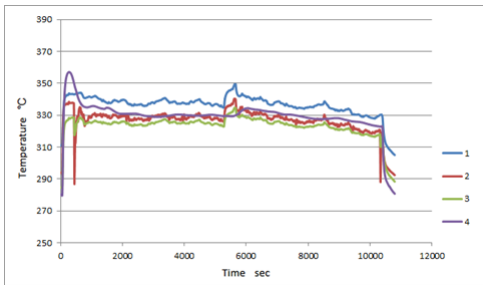


Fig. 7 Exhaust gas temperature on SCR system according to time

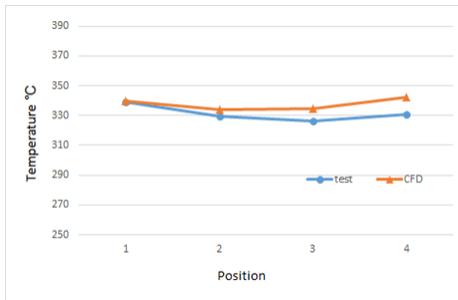


Fig. 8 Comparison of exhaust gas temperature on SCR system between experimental and CFD data

실험값과 수치해석 값을 비교한 결과를 Fig. 8에 나타내었다. 앞선 연구에서는 340°C로 일정) 하였지만 이번 결과는 유동에 따른 온도변화를 반영하였다. 수치해석 결과 값이 실제 실험값보다 ①에서는 약 1°C, ②에서는 약 4°C, ③에서는 약 8°C, ④에서는 약 11°C 높았고 후단으로 흘러갈수록 차이가 나는 경향을 나타내었다. 그 이유는 시스템을 단열로 가정하였고, 요소수량, 유동에 대

한 오차 등이 포함되었기 때문으로 사료된다. 한편 수치해석 결과는 ④에서 온도가 상승하는 실험결과의 온도분포 경향을 잘 반영하고 있다.

5. 결 론

부경대학교 실습선 가야호의 발전기 엔진에 SCR 시스템의 CFD 해석에 있어 요소수 분사 모델 및 화학 반응 모델을 반영하여 4개 위치에서의 온도 변화에 대해서 실측과 비교하였다. 그 결과, 시스템 내의 온도 분포에 있어서 실험과 수치해석 결과값은 ①에서는 약 1°C, ②에서는 약 4°C, ③에서는 약 8°C, ④에서는 약 11°C 높았고 수치해석 결과는 실제 온도 분포의 경향을 반영하였다.

후 기

이 논문은 부경대학교 자율창의기술연구비(2017년)에 의하여 연구되었음.

References

1. K. Sandelin, 2016, "SCR under pressure - pre-turbocharger NOx abatement for marine 2-stroke diesel engines", CIMAC 2016, pp. 111.
2. M. K. Kim, 2016, "Design of an efficient urea decomposition chamber using urea decomposition catalyst in NoNOx-LP SCR system for 2-stroke engine", CIMAC 2016, pp. 172.
3. S. Shaowei, 2016, "Optimization of NOx-Emission Reduction in Medium-Speed Marine Diesel Engines with SCR-Catalyst", CIMAC 2016, pp. 243.
4. H. Korpi, 2016, "Development of exhaust gas aftertreatment systems applied to modern high efficiency four-stroke medium-speed engines", CIMAC 2016, pp. 97.
5. J. Torrkulla, 2016, "Wartsila SCR development and experience for IMO Tier III", CIMAC 2016, pp. 204.

6. F. Kock, 2016, "Marine Diesel Engines with SCR: Class Societies' Best Practices", CIMAC 2016, pp. 160.
7. S. C. Hwang, 2017, "Flow Characteristics on Exhaust Gas Varying to Configuration and Porosity of Ship De-NOx System", Ph.D thesis, Pukyong National University, Busan, Korea.
8. S. H. Jung, T. Y. Kim and S. C. Hwang, 2015, "Performance Evaluation of SCR System for Generator Engine on Training Ship KAYA", Journal of the Korean Society for Power System Engineering, Vol. 19, No. 6, pp. 68-74. (DOI:10.9726/kspse.2015.19.6.068.)
9. H. J. J, 2016, "Numerical Analysis of Flow Mixing of Urea-Water-Solution According to Mixer Configuration in SCR Systems", M.D. thesis, Pukyong National University, Busan, Korea.
10. F. A. L. Dullien, 1992, "Porous Media: Fluid Transport and Pore Structure - SE", Academic press Inc., California, pp. 333-379.