



저작자표시-비영리-변경금지 2.0 대한민국

이용자는 아래의 조건을 따르는 경우에 한하여 자유롭게

- 이 저작물을 복제, 배포, 전송, 전시, 공연 및 방송할 수 있습니다.

다음과 같은 조건을 따라야 합니다:



저작자표시. 귀하는 원저작자를 표시하여야 합니다.



비영리. 귀하는 이 저작물을 영리 목적으로 이용할 수 없습니다.



변경금지. 귀하는 이 저작물을 개작, 변형 또는 가공할 수 없습니다.

- 귀하는, 이 저작물의 재이용이나 배포의 경우, 이 저작물에 적용된 이용허락조건을 명확하게 나타내어야 합니다.
- 저작권자로부터 별도의 허가를 받으면 이러한 조건들은 적용되지 않습니다.

저작권법에 따른 이용자의 권리는 위의 내용에 의하여 영향을 받지 않습니다.

이것은 [이용허락규약\(Legal Code\)](#)을 이해하기 쉽게 요약한 것입니다.

[Disclaimer](#)

공 학 석 사 학 위 논 문

가야호 SCR 시스템의 수치
유동해석과 실험결과 비교



2018년 8월

부 경 대 학 교 대 학 원

기 계 시 스템 공 학 과

취 평 런

공학석사학위논문

가야호 SCR 시스템의 수치
유동해석과 실험결과 비교

지도교수 정 석 호

이 논문을 공학석사 학위논문으로 제출함

2018년 8월

부경대학교 대학원

기계시스템공학과

취 평 런

취평련의 공학석사 학위논문을 인준함.

2018년 8월 24일



위원장 공학박사 고대권 (인)

위원 공학박사 김영복 (인)

위원 공학박사 정석호 (인)

목 차

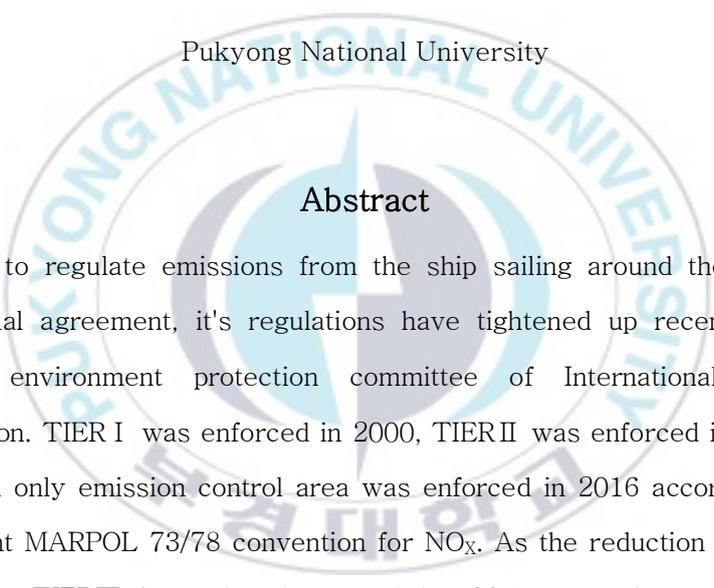
Abstract	iii
기호 설명	v
1. 서 론	1
1.1 연구 배경	1
1.2 연구 목적	3
2. 선박용 디젤엔진의 질소산화물 저감 기술	5
2.1 전처리 기술	5
2.2 후처리 기술	8
2.3 SCR 시스템의 작동원리	8
3. SCR 시스템의 수치해석 모델 및 모델링	11
3.1 수치해석 모델	11
3.2 SCR 시스템 수치해석 모델링	19
3.2.1 입구 경계 조건	21

3.2.2 출구 경계 및 벽면 조건	23
3.2.3 요소수 분무 조건	23
3.2.4 촉매 모델링	27
3.3 SCR 시스템 유동 실험 방법	33
4. 실험 결과 및 고찰	35
4.1 질량 분율 해석 결과	35
4.2 SCR 시스템의 온도 분포	42
5. 결 론	46
참고 문헌	48

Comparison of test results with numerical flow
analysis of SCR system in Kaya ship.

Xu Fengren

Department of Control and Mechanical Engineering, The Graduate School,
Pukyong National University



Abstract

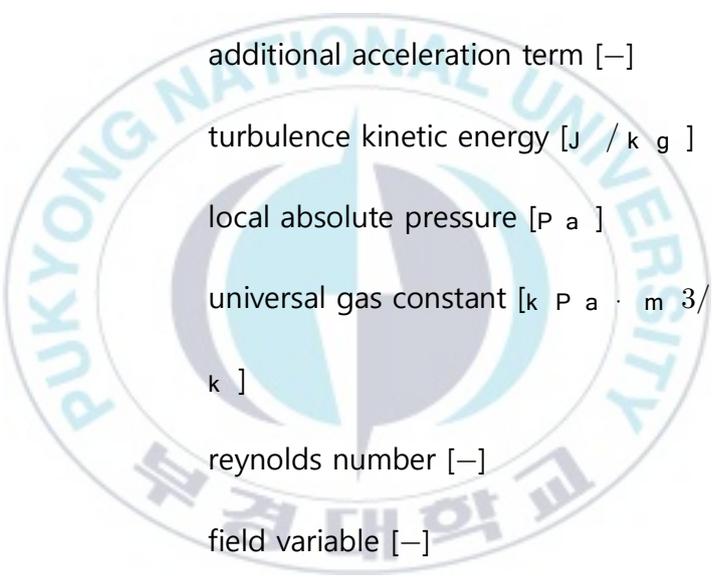
In order to regulate emissions from the ship sailing around the world by international agreement, its regulations have tightened up recently by the maritime environment protection committee of International Maritime Organization. TIER I was enforced in 2000, TIERII was enforced in 2011 and TIERIII on only emission control area was enforced in 2016 according to the amendment MARPOL 73/78 convention for NO_x . As the reduction aim at NO_x emitted on TIERIII is to be decreased by 80% comparing with TIER I, achievement in reduction of NO_x by engine's own technologies is hard. An SCR receives attention as realizable technology.

In previous research, flow analysis about SCR system in training ship KAYA at Pukyong national university was accomplished by CFD for optimal design. Urea injection and a chemical reaction were not considered. In this study, components like NH_3 , NO , O_2 , H_2O , N_2 and CO_2 , and temperature distribution of exhaust gas

in the SCR system are analyzed by CFD to consider them. As the result, NH_3 , NO , and O_2 are decreased but H_2O , N_2 , and CO_2 are increased after catalysis because urea solution is added and react with them. The temperature distribution by CFD is slightly different from the experimental data, it's a trend which increase and decrease are similar.



기호 설명



c_p	specific heat capacity [J/(kg · K)]
$C_{1\varepsilon}$, $C_{2\varepsilon}$, $C_{3\varepsilon}$	constant [–]
d_p	particle diameter [m]
\vec{F}	additional acceleration term [–]
k	turbulence kinetic energy [J / k g]
p	local absolute pressure [P a]
R	universal gas constant [k P a · m ³ / k g · k]
Re	reynolds number [–]
ϕ	field variable [–]
ρ	fluid density [k g / m ³]
μ	molecular viscosity of the fluid [k g / m · s]
ε	dissipation rate [–]
$\sigma_k, \sigma_\varepsilon$	turbulent Prandtl numbers [–]
β	coefficient of thermal expansion [1/K]

1. 서론

1.1. 연구 배경

세계 각국을 항해하는 선박으로부터 배출되는 에미션은 국제협약에 의해 규제되어야 하기에 국제해사기구(IMO : International Maritime Organization)의 해양환경보호위원회(MEPC : Maritime Environment Protection Committee)에서 해양대기 환경 규제를 협의하고 있고 규제는 점점 강화되어 가고 있는 추세다. 디젤엔진에서 많이 배출되고 있는 에미션 중 질소산화물은 인체에 유해하고 산성비와 미세먼지의 주요 원인이다. MARPOL 협약에 따라 2000년에 TIER I이 발효되었고, 2011년에는 TIER II가 발효되었다. 이 경우는 엔진 자체만의 기술로 감소가 가능하도록 TIER I에 비해 약 20% 감소하였기에 엔진 메이커들은 연소실 설계 변경, 연료 분사계통 및 흡배기계통 설계 변경, 밀러 사이클의 도입^[1-3]등으로 대응하였다.

2016년 1월 1일부터 시행된 Tier III 배기규제는 에미션 규제 지역(ECA : Emission Control Area)을 항해하는 신조 선박에 한하여 발효되었다. Fig. 1에 나타난 것처럼 ECA 지역에는 탈질설비를 가동하여야 하고

그 외 공해상에서는 Tier II를 만족하여야 한다^[4]. Fig. 2에 나타난 것처럼 TIERIII에서는 TIER I 대비 약 80% 감소를 목표로 하였기 때문에 엔진 자체만의 기술로는 감소량을 달성하기 어렵다. 이를 위해 배기 후처리 기술이 필요한데 선택적 환원 촉매(SCR : Selective Catalytic Reduction)가 가장 실현 가능한 장비로 주목받고 있다^[5-14].

최근 SCR 시스템을 탑재한 선박이 등장하기 시작하고 있으나 실전에서 테스트한 연구가 아직 드물고, 기존 선박에 리트로핏을 실시한 연구^[4]가 있었다. 이 연구는 SCR 시스템을 실선에 장착하기 위한 유동해석, 최적 설계 및 실험값과의 비교를 실시하였다. 그러나 이 연구에서의 유동해석은 배기가스의 유동에 따른 해석만 실시하였기 때문에 요소수의 분사에 따른 질량 변화와 화학반응에 대한 고려가 없었다.

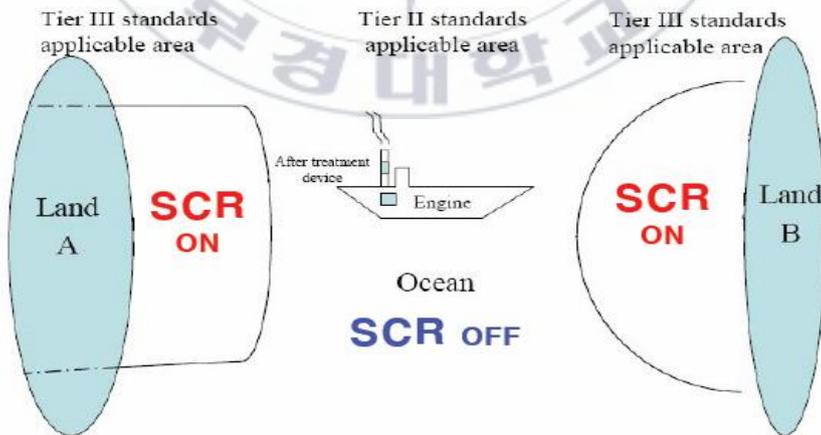


Fig. 1. Diagram of Tier III emission control application area^[4]

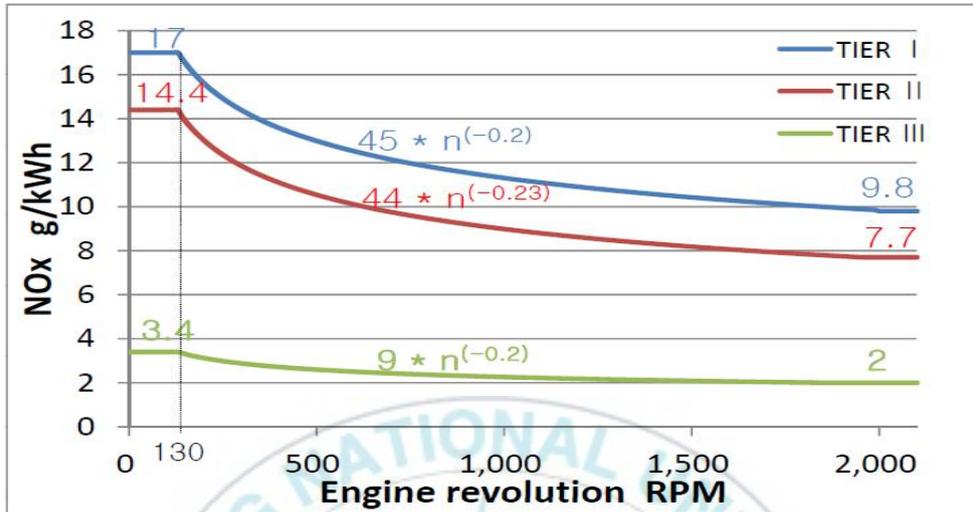


Fig. 2. NOx regulation of MARPOL 73/78 convention

1.2. 연구 목적

1.1 절에서 설명한 것처럼 국내 최초로 관공선인 부경대학교 실습선 가야호의 1번 발전기 엔진에 탈질설비를 장착하고 성능을 평가함에 있어 설계 전 유동특성해석, 최적형상 설계, 설치 후 유동특성 실험결과 비교를 통해 탈질설비의 설계 만족도를 높이기 위한 연구가 진행되었으나 질소산화물의 환원을 위해 환원제로 분사되는 요소수의 분사, 증발, 화학반응이 포함되어 있지 않기 때문에 정확한 유동현상과 온도변화에 대한 유동해석 결과를 나타낼 수가 없었다. 이 연구에서는 같은 실험장비를 이용하여 유동

해석에 있어 분사 및 증발 모델을 추가하고 배기관의 열전달 모델을 추가하여 실시하여 실험결과에 가장 유사한 모델을 제시하고자 한다.

2장에서는 SCR 시스템과 관련된 내용을 설명하고 3장에서는 유동해석을 위한 모델링에 대해서 설명한다. 4장에서는 유동해석 결과와 실험결과를 비교 검토한다.



2. 선박용 디젤엔진의 질소산화물 저감 기술

선박용 디젤엔진의 질소산화물 저감 기술은 전처리기술과 후처리기술로 분류할 수 있다. 전처리와 후처리는 배기가스가 디젤엔진의 연소실을 빠져나가기 전과 후로 구분하는 것이 타당하고, 일반적으로 전처리는 Tier II, 후처리는 Tier III 대응 기술로 봐도 무방하다.

2.1. 전처리 기술

전처리 기술은 배기가스가 선박용 디젤엔진의 연소실에서 생성되어 배기 밸브를 통해 배기 시스템으로 빠져나가기 전까지 처리되는 것을 의미하며, 연소와 관련되는 부품을 수정하는 방법과 연소 형태를 수정하는 방법으로 나눌 수 있다^[15].

1) 연소와 관련된 부품 수정

연소와 관련된 부품은 다음과 같이 세 가지로 분류된다.

가) 연소실 형상

연소실을 형상하는 부품은 실린더 헤드, 피스톤, 실린더 라이너이며 이들

에 의해 형성된 연소실의 모양이 압축비와 연료의 분무 등과 연관되어 각각의 운전조건에서 연소의 형태를 결정짓고 질소산화물의 생성에 영향을 미치게 된다. 일반적으로 압축비를 높이면 질소산화물의 저감을 꾀할 수 있으나 저부하에서의 스모크 문제 등이 야기된다.

나) 연료 분사와 관련된 부품

연료 분사 펌프, 캠축, 연료 분사 노즐 등이 연료의 분무 형태를 바꾸어 연소에 영향을 미친다. 대표적인 기술인 연료 분사 시기를 늦추는 것인데, 이는 연료 소비율을 증가시키는 원인이 된다. 연료 분사 노즐의 노즐 홀 수와 분사 각도에 따라 분무 형태가 바뀌어 질소산화물의 증감이 결정된다. 연료 분사 펌프의 플런저와 캠축의 형상에 의해 연료 분사 압력이 변화되는데 이를 통해 분무 형태가 바뀌어 질소산화물의 증감이 결정된다.

다) 흡기와 관련된 부품

흡기와 관련된 부품으로는 터보차저, 에어 쿨러, 흡기포트가 있다. 특히 터보차저는 밀러 사이클의 도입 시 더 높은 압력을 요구하기 때문에 질소산화물의 저감을 위해서는 고사양의 터보차저가 요구된다.

2) 연소 형태의 수정^[6].

가) 밀러 사이클

밀러 사이클은 압축행정보다 팽창행정을 길게 함으로써 고효율을 얻기 위해 고안된 사이클인데, 더 높은 흡기압력을 적용하여 연소온도를 낮추는 효과를 낼 수 있다. 따라서 고출력을 내면서도 질소산화물을 줄이는 효과를 나타내어 TIERU 규제에 많은 엔진 메이커에서 적용한 기술이다.

나) 배기가스 재순환

배기가스에는 연소로 인해 다량의 CO_2 와 H_2O 가 포함되어 있다. 이들은 3 원자 분자로 비열이 높아 압축행정 시 공기만으로 충전되었을 때보다 연소실의 압축 압력을 낮추는 효과를 볼 수 있다. 따라서 배기가스를 흡기에 유입시켜 연소실 온도를 낮추어 질소산화물을 줄이는 효과를 볼 수 있다.

다) 유화유

연료에 물을 섞어 유화시킨 것으로 에멀전 연료라고도 한다. 연료에 수분이 공급됨으로써 분무 시 주위의 온도를 낮추어 질소산화물의 저감 효과를 볼 수 있고 수분에 의해 활성화기인 H^- , O^- , OH^- 가 생성되어 연소촉진 효과를 일부 볼 수 있다.

라) 예 혼합 압축 착화

예 혼합 압축 착화(PCCI:Premixed Charge Compression Ignition)는 불꽃 점화방식의 휘발유 엔진과 압축착화 방식의 디젤 엔진의 장점을 적용한 방식으로 휘발유 엔진처럼 예 혼합 가스를 연소실에 도입하고 이를 디젤

엔진처럼 압축점화로 연소시키는 방식이다. 이를 통해 당량 비가 낮고 연소 온도가 낮은 영역에서의 연소가 가능하여 질소산화물을 저감시키는 방식이다.

2.2. 후처리 기술

일반적으로 널리 쓰이는 후처리 기술은 선택적 촉매 환원(SCR: Selective Catalytic Reduction) 장치이다. 이는 2.3절에서 설명하고 아직 연구단계에 있는 기술로는 플라즈마 적용 기술^[17-18]이 있다. 플라즈마를 적용하는 것은 관련 장비들과 유지비용이 고가이기 때문에 상용화까지는 개발이 어려울 것으로 판단된다.

2.3. SCR 시스템의 작동원리

그림 3에 SCR 시스템의 간단한 작동원리에 대해서 나타내었다. 질소산화물을 포함한 배기가스가 촉매를 거쳐 질소와 수증기로 환원되어 배출되

어지는 과정을 설명하면 다음과 같다^[19-20].

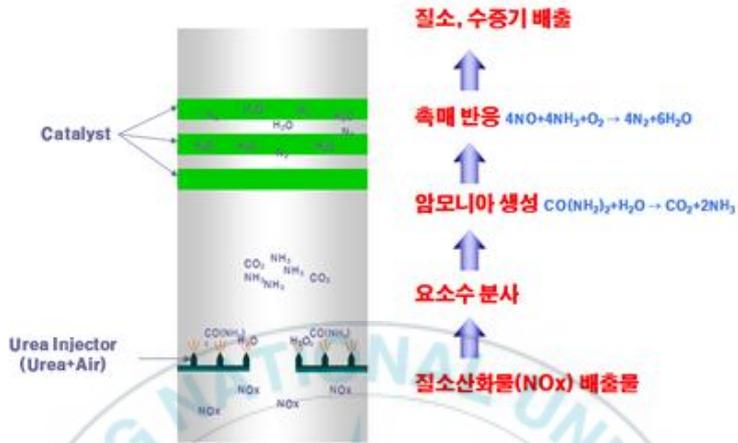


Fig. 3. Principle of SCR system

(1) 암모니아(NH₃)의 생성

요소수는 노즐에서 배기관내에 분사되어 배기가스의 열로 인해 다음과 같은 3단계를 거쳐 암모니아 가스로 변환된다.

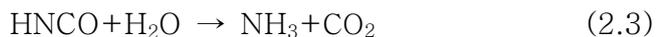
① 요소수의 미립화



② 요소의 열분해



③ HNCO 수분해

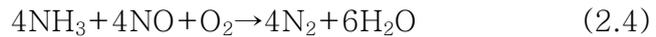


(2.1)과 (2.2)식은 흡열 반응이다.

(2) NO_x의 촉매 환원 반응

NO_x의 촉매 환원 반응의 두 가지 주요 반응은 다음과 같다.

① 표준 반응



② 빠른 반응



배기가스 내의 질소산화물 총량의 90% 이상이 NO이기 때문에 식 (2.4)가 SCR 촉매 반응에서 지배적인 위치를 차지한다. 그러나 식 (2.5)의 우선 순위도 높은 편이다. 식 (2.4)와 (2.5)의 반응을 통해 대부분의 질소산화물은 질소와 물로 환원된다.

(3) 기타 반응

NH₃ 및 NO_x의 촉매 환원 반응과 동시에 다음과 같이 부반응(side reaction)이 일어날 수 있다.



3. SCR 시스템의 수치해석 모델 및 모델링

3.1. 수치해석 모델

SCR 시스템의 설계 작업은 매우 복잡하다. 반응기 구조의 설계, 배기가스와 암모니아는 배기관과 반응기 내의 난류 유동, 열 및 물질 전달, 다중 구성 요소 전송 그리고 화학 반응 및 요소 분무 운동 등의 과정을 포함하기 때문이다. 실제 상황에 따라 SCR 시스템을 시뮬레이션 한다면 컴퓨터 메모리의 고사양이 필요하다. 실질적인 조건과 문제점을 결합해 실질적인 배기 유동과 화학 반응을 최대한 이끌어 내기 위해서 적절한 절차가 요구된다. 표준 $k-\epsilon$ 모델, 물지 수송 모델, 통용 유한 속도 모델, 다공 매질 모델, 이산상 모델은 이를 해결하는 좋은 선택으로 사료된다.

1) $k-\epsilon$ 모델

가) 표준 $k-\epsilon$ 모델^[21]

본 연구에서는 배기가스는 배기관에 유동 비압축 정상 유동을 한다고 가정한다. 표준 $k-\epsilon$ 모델은 가장 전형적이고 광범위한 2 방정식 모델이다. 모델은 Boussinesq 가설에 근거하여 복잡한 유동에 대한 모의 정확도가

낮지만 안정성이 좋아서 컴퓨터 사양에 대한 요구가 낮다. 따라서 공학 응용 dp 비교적 적합하여 표준 k-ε 모델을 사용하였다. 표준 k-ε 모델 중 난류 운동에너지 k와 난류 소산율 ε에 상응하는 운동 방정식은 다음과 같다.

$$\frac{\partial(\rho k)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho k u_i)}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] + G_k + G_b - \rho \varepsilon - Y_M + S_k \quad (3.1)$$

$$\frac{\partial(\rho \varepsilon)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho \varepsilon u_i)}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\varepsilon} \right) \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} \right] + C_{1\varepsilon} \frac{\varepsilon}{k} (G_k + C_{3\varepsilon} G_b) - C_{2\varepsilon} \rho \frac{\varepsilon^2}{k} + S_\varepsilon \quad (3.2)$$

식에서 μ 는 난류 점도, G_k 와 G_b 는 각각 평균 속도 기울기(Mean velocity gradient)와 부력에 의해 야기되는 난류 운동 에너지의 생성을 의미한다. Y_M 은 압축성 난류 중 과도하게 확산되는 과동, S_k 와 S_ε 은 사용자의 자정향, ∂k 와 $\partial \varepsilon$ 는 각각 난류 운동 에너지 k와 난류 산란율에 해당하는 프랜틀 수(Prandtl number)로 디폴트 값은 각각 1.0과 1.3이다. $C_{1\varepsilon}$, $C_{2\varepsilon}$, $C_{3\varepsilon}$ 는 경험 상수이며 디폴트 값은 각각 1.44, 1.92, 0.09이다.

식(3.1) 와(3.2) 중 G_k , G_b , Y_M 의 계산식은 다음과 같다.

$$G_k = \mu_t \frac{\partial u_i}{\partial x_j} \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) \quad (3.3)$$

$$G_b = \beta g_i \frac{\mu_t}{Pr_t} \frac{\partial T}{\partial x_i} \quad (3.4)$$

$$Y_M = 2\rho \varepsilon M_t^2 \quad (3.5)$$

나) RNG k-ε 모델

k-ε 방정식에서 상수들은 실험값을 통해 실증적으로 얻는 반면, RNG 모델은 환치 계산법 집단 이론(renormalization group theory)을 이용하여 분석적으로 구하게 된다. 난류 소산율 또한 수정 되었다. 큰 변형율(strainrate)을 갖는 유동 및 박리(separation) 유동에서 표준 k-ε 모델보다 더 좋은 결과를 보여준다.

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho k) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho k u_i) = \frac{\partial}{\partial x_j}(\alpha_k \mu_{eff} \frac{\partial k}{\partial x_j}) + G_k + G_b - \rho \varepsilon - Y_M + S_k \quad (3.6)$$

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho \varepsilon) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho \varepsilon u_i) = \frac{\partial}{\partial x_j}(\alpha_\varepsilon \mu_{eff} \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j}) + C_{1\varepsilon} \frac{\varepsilon}{k} (G_k + C_{3\varepsilon} G_b) - C_{2\varepsilon} \rho \frac{\varepsilon^2}{k} - R_\varepsilon + S_\varepsilon \quad (3.7)$$

여기서, $C_\mu = 0.0845$ 이다.

다) Realizable k-ε 모델

난류 소산율은 mean-square vorticity fluctuation을 이용하여 유도되어지며, 표준 k-ε 모델과는 근본적으로 다르다. 회전을 포함한 유동(flows involving rotation), 역 압력 구배에서의 경계층, 박리와 재순환 유동에서 보다 향상된 성능을 보여준다.

$$\frac{\partial(\rho k)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho k u_j)}{\partial x_j} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] + G_k + G_b - \rho \varepsilon - Y_M + S_k \quad (3.8)$$

$$\frac{\partial(\rho \varepsilon)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho \varepsilon u_j)}{\partial x_j} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\varepsilon} \right) \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} \right] + \rho C_{1\varepsilon} S \varepsilon - \rho C_{2\varepsilon} \frac{\varepsilon^2}{k + \sqrt{\nu \varepsilon}} + C_{1\varepsilon} \frac{\varepsilon}{k} G_{3\varepsilon} G_b + S_\varepsilon \quad (3.9)$$

$$C_1 = \max \left[0.43, \frac{\eta}{\eta + 5} \right], \eta = S \frac{k}{\varepsilon}, S = \sqrt{2 S_{ij} S_{ij}} \quad (3.10)$$

Realizable $k-\varepsilon$ 모델에서 C_μ 는 상수가 아니다.

$$C_u = \frac{1}{A_0 + A_s \frac{kU^*}{\varepsilon}} \quad (3.11)$$

여기서,

$$U^* = \sqrt{S_{ij}S_{ij} + \widetilde{\Omega}_{ij}\widetilde{\Omega}_{ij}} \quad (3.12)$$

$$\widetilde{\Omega}_{ij} = \Omega_{ij} - 2\varepsilon_{ijk}\omega_k, \overline{\Omega}_{ij} = \overline{\Omega}_{ij} - \varepsilon_{ijk}\omega_k \quad (3.13)$$

으로 정의된다.

상수 $A_0 = 4.04$, $A_s = \sqrt{6} \cos\phi$ 이다.

2) 물질 운송 및 화학 반응 모델

Fluent는 강력한 화학 반응을 모의하는 능력을 갖추고 있으며 여러 해 동안 사람들이 많은 사업상의 난제들을 해결하였다. NOX와 기타 오염이 형성된 기상 반응, 고체 벽면에서 발생하는 표면 반응과 입자 표면 반응 등이 모의할 수 있다.

Fluent는 네 가지 화학 반응 방법을 제공한다. 통용 유한-속도 모델 (Generalized Finite-Rate Model), 무 혼합 연소 모델(Non-premixed combustion model), 혼합 연소 모델 (Premixed combustion model) 및 부분 혼합 연소 모델(Partial premixed combustion model)^[22]. 본문에 통

용 유한 속도 모델(Generalized Finite-Rate Model)을 나타내는 척도를 선택했다.

통용 요한 속도 모델은 다양한 성분 혼합, 수송, 반응을 시뮬레이션할 수 있을 뿐 아니라 벽면이나 입자의 표면 반응을 모의할 수도 있다. 이 모델은 사용자 스스로 정의로운 화학 반응 메커니즘을 이용하여 각 화학 팀의 질량 분수에 의한 수송 방정식을 근거로 화학 반응을 시뮬레이션한다. 이 중 반응 속도는 원항(source term)의 형식으로 운송 방정식에 나타났다. 반응 속도의 산정 방법은 여러 가지 방법이 있는데 본문은 요한 속도 모델을 사용한다.

이번 수치의 시뮬레이션 과정에서 유동 매질은 배기가스와 암모니아이며 배기가스와 암모니아의 혼합 정도를 관찰할 수 있으므로 본 연구는 물리 수송 모델을 적용했다.

FLUENT의 화학 반응 모형에서는 제*i*종 성분의 대류-확산 방정식을 통해 그룹별로 구분된 현지 성분의 질량 분수 Y_i 을 계산한다. 보존 방정식은 아래의 표현 식을 채택한다.

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho Y_i) + \nabla(\rho \vec{v} Y_i) = -\nabla \vec{J}_i + R_i + S_i \quad (3.14)$$

식에서 R_i 는 제*i*종 성분의 순 생산율(net rate of production)이다. S_i 는 확산 상(diffusion phase)을 사용자 원항(source term)을 더한 소스의 순

생산율이다. 사용자의 정의 모델에 대해서는 시스템에 N 종의 유체 상 (fluid phase)의 화학성분이 있을 때 총 질량 분율의 합이 1이기 때문에 이런 식의 방정식을 푸는 데는 반드시 N-1의 방정식이 필요하다. 1에서 N-1개의 질량 분수를 차감하면 제N개 요소의 질량 분율을 획득할 수 있다. 따라서 오차 최소화를 위해서는 성분별로 질량 분수가 가장 큰 성분 제N종 성분으로 매겨야 한다. 그래서 질량 분수가 가장 큰 물질을 맨 마지막의 입력해야 하며, 예컨대 본문 SCR 탈질 반응이 모의할 때 N₂가 마지막으로 입력해야 합니다.

난류 상황에서 FLUENT는 질량 확산을 고려한 포태식 다음과 같습니다.

$$\vec{j}_i = -\left(\rho D_{i,m} + \frac{\mu_t}{Sc_t}\right) \nabla Y_i \quad (3.15)$$

식에서 Sc_t는 난류 슈미트 수 (Turbulent schmidt number)이고 μ_t는 난류 점도를 나타낸다. Sc_t 디폴트 값은 0.7, D_{i,m}는 혼합물 중 i 성분의 확산 계수이다.

3) 분무 모델

SCR 시스템에 사용되는 노즐은 공기 보조 분사형식이며 요소 수용액 분사 모의 과정에서는 이산 디스크릿 모델(DDM, Discrete Droplet Model)을 사용한다. 연속적인 방정식과 운동량 보존 방정식과 에너지 보존 방정식을

중점적으로 해석하여 기상 유동의 모의를 완성한다. 기상 유동의 난류 특성을 표현하기 위해 $k-\epsilon$ 2차 방정식 모델을 채택한다. 액상이 존재하므로 이러한 균질 류(homogenous flow) 방정식 기초 위에 상응하는 원상을 첨가하는 것이 액적이 기상에 미치는 영향에 대하여 나타낸다.

전체 분무 과정은 오일러-라그랑주 방정식(Euler-Lagrange equation)으로 해석한다. 기상 유체를 연속 매개체로 하여 오일러의 방법을 이용하여 기상 유동 편미분 방전을 해석하다 라그랑주 방식으로 이산 액적의 운동을 추적하다. 기상의 성질을 묘사하는 편미분 방정식에 부가 원상을 첨가하여 액상이 상대적으로 기상의 간섭을 계산하다. 기체와 액체의 두 가지 방정식을 교체해서 해결하며 SCR 시스템 내 각 시간 단위별로 나뉘는 농도 분포와 기타 계수를 계산할 수 있다.

액적의 모양은 완전한 구형이고 건조되는 동안 형태상의 변형이 생기지 않으며 액적들의 상호간 영향은 무시할 수 있다고 가정한다. 이에 따라 액적의 속도는 항력과 중력의 향으로써 다음과 같이 나타낸다^[23].

$$\frac{du_p}{dt} = F_D(\vec{u} - \vec{u}_p) + \frac{\vec{g}(\rho_p - \rho)}{\rho_p} + \vec{F} \quad (3.16)$$

여기서 \vec{F} 는 추가 가속도 항이고, $F_D(\vec{u} - \vec{u}_p)$ 는 한 개 액적당의 항력 항으로 다음과 같다.

$$F_D = \frac{18\mu}{\rho_p d_p^2} \frac{C_D Re}{24} \quad (3.17)$$

식에서 : u 는 유체 위상 속도, u_p 는 입자 속도, μ 는 유체 역학 점도, ρ 는 유체 밀도, ρ_p 는 입자 밀도, d_p 는 입자 지름 (particle diameter) ; Re 는 상대 레이놀즈 수 (Relative Reynolds number) 여기서 레이놀즈수 (Re)는 다음과 같다:

$$Re = \frac{\rho d_p |\bar{u}_p - \bar{u}|}{\mu} \quad (3.18)$$

4) 다공 매질 모델

촉매는 SCR의 핵심으로 본 연구에서는 벌집 모양(Honeycomb type)의 촉매 층(Catalyst bed)을 사용하였다. 수치 해석에서 벌집 모양의 구조 그대로 메싱을 하면 수천만 개의 격자를 이루게 되어 컴퓨터 사양 상 해석에 어려움이 있다. 따라서 촉매 층을 다공 매질 지역으로 간략히 하였다. 이러한 종류의 모델에 대한 요구는 그다지 엄격하지 않으며 동시에 수치 해석에 의한 요구를 충족할 수 있다.

다공 매질 모델은 다공 매개체로 정의되는 곳에서 경험적 가정에 근거한 유동 저항력을 결합시켰다. 본질적으로 다공 매질 모델은 표준 Navier-Stoke 방정식에서 동적 에너지 원상(dynamic energy item)을 기준으로 하여 통로 내의 가스 유속을 계산하다. 원상은 Viscous loss term과 Inertia loss term을 포함한다^[24].

$$S_i = - \left(\sum_{j=1}^3 D_{ij} \mu v_j + \sum_{j=1}^3 C_{ij} \frac{1}{2} \rho |v| v_j \right) \quad (3.19)$$

식에서 S_i 는 $i(x,y,z)$ 운동량 방정식의 원항(The source term of the momentum equation), D 와 C 는 행렬, $|v|$ 는 속도의 크기이다.

운동량 원항(momentum source term)은 다공 매질 구역의 압력 경도 (pressure gradient)에 영향을 주어 속도와 크기가 비례하는 압력 강하 (pressure drop)를 생성한다. 각 등방성(isotropy)의 다공 매질에 대한 간단한 경우는 다음과 같다.

$$S_i = - \left(\frac{\mu}{\alpha} v_i + C_2 \frac{1}{2} \rho |v| v_j \right) \quad (3.20)$$

식에서 α 는 투과 계수(Permeability coefficient), C_2 는 관성 저항 계수 (Inertial resistance coefficient)이다. D, C 행렬을 대각 행렬로 간소화하고, 각 부분의 계수는 각각 $1/\alpha$ 와 C_2 이고 기타 원소는 0이다.

3.2. SCR 시스템 수치해석 모델링

부경대학교 실습선 가야호 SCR 시스템의 수학 모델링을 구축한다. 앞서 연구의 분석을 토대로 하여 화학 반응을 추가하여 SCR 시스템 내부 온도 변화를 수치 해석하고자 한다. 해석 모델링의 개념도는 fig. 4와 같고 좌표

는 Table 1과 같이 세팅하였다.

Fig. 4. Modeling of SCR system of KAYA ship

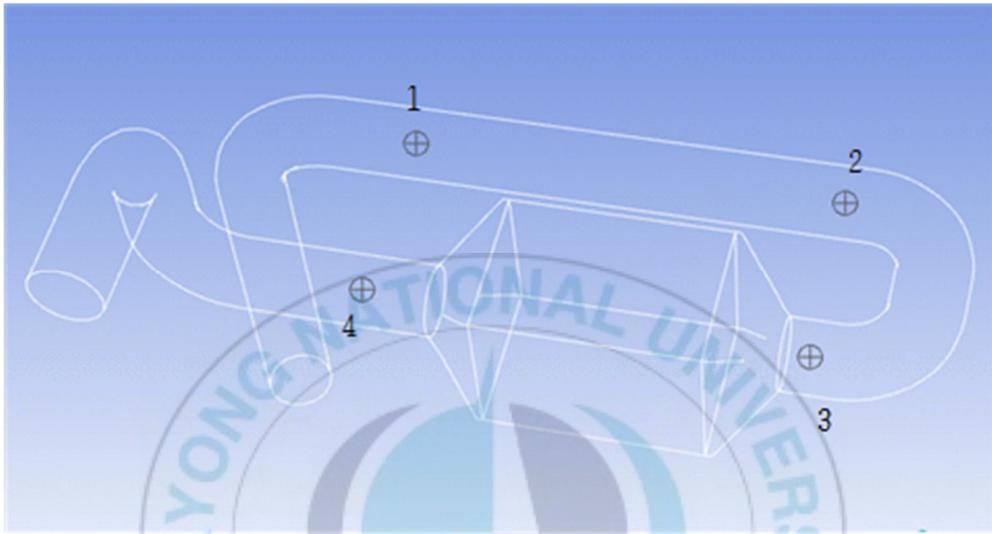


Table 1. Coordinates of SCR system modeling

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

3.2.1 입구 경계 조건

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 160kW의 부하일 때 실시하여 이에 맞추었다. 이 때의 배기가스 온도는 340℃, 배기가스 유속은 8m/s였다. 배기가스 내의 각 성분의 몰질량 M은 이상 기체 상태의 방정식을 활용하여 배기가스의 질량을 카본 밸런스 법에 의해 계산하여 질량 분율에 따라 산정하였다.

$$pM = \rho RT \quad (3.21)$$

식에서 R는 기체 상수이고 8.314J/mol·K이다.

배기가스의 질량유량해석 방정식은 식 (3.22)와 같다.

$$Q_{m,ext} = \rho v \pi r^2 \quad (3.22)$$

가야호 발전기 디젤엔진의 성능 관련 데이터를 통해 배기가스의 질량유량은 $Q_{m,ext}$ 는 0.3374kg/s으로 하였다.

동점도 계산을 위한 경험 방정식은 식 (3.23)과 같다.

$$\mu = \mu_0 \frac{273+C}{T+C} \left(\frac{T}{273}\right)^{3/2} \quad (3.23)$$

식에서 $\mu_0=1.7110^{-5}$ Pa/s, $T=723.15$ K, $C=111$ K 대입하여 배기가스 동

점도 $\mu = 3.05 \times 10^{-5} \text{Pa/s}$ 이다.

노즐 입구 레이놀즈 수는 식 (3.24)로 구하였다.

$$Re = \frac{\rho v D}{\mu} \quad (3.24)$$

식에서 D는 배기관 지름으로 0.30m, 데이터를 대입하여 구하면 $Re = 46922.1$ 로 8000보다 크기 때문에 배기가스는 난류 유동이다.

배기가스 난류 강도는 식 (3.25)를 통해 구한다.

$$I = 0.16 Re^{-1/8} \quad (3.25)$$

데이터를 대입하면 $I = 4.17\%$ 가 된다.

난류운동에너지(Turbulence Kinetic Energy)와 난류길이척(Turbulence Length Scale)는 각각 다음의 경험 방정식과 같이 구할 수 있다.

$$k = \frac{3}{2} (vI)^2 \quad (3.26)$$

$$l = 0.07L \quad (3.27)$$

식 중 L은 배기관 지름으로 정의할 수 있고 데이터를 대입하면 $k = 0.167$, $l = 0.0417$ 의 값으로 정의된다.

위의 결과를 정리하여 Table 2와 같다.

Table 2. Entrance boundary conditions of SCR system

성분	NO	H ₂ O	O ₂	CO ₂	N ₂
질량 분율%	0.000755	0.081	0.1745	0.0489	0.695
디젤엔진 배기	질량 유량 kg/s	출구 압력 Pa	배기 온도 K	물 질량 g/mol	배기 밀도 kg/m ³
	0.3374	101325	613.15	28.67	0.597
계수	배기 유속 m/s	동력 점도 Pa/s	수력 지름 m	난류 강도 %	난류 운동 에너지 m ² /s ²
	8	3.05×10^{-5}	0.3	4.17	0.167

3.2.2 출구 경계 및 벽면 조건

출구 경계 조건은 보통 정압(static pressure)으로 표준 대기압 101325 Pa로 설정한다. 벽 속도 경계조건을 0으로 설정하였다.

3.2.3. 요소수 분무 조건

(1) 요소수 이론 수요량

본 연구에서 사용한 요소수는 질량 농도 40%의 수용액으로 SCR 시스템

내에 분사되어 암모니아로 분리되고 암모니아가 탈질 반응의 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 특성 충족한다.
- ② 반응식 (2.1)~(2.5)가 완전하게 진행되고 요소수는 모두 NH_3 로 분해되어 NO_x 와 반응한다.
- ③ 촉매 반응은 단지 표준 반응에만 해당된다.
- ④ 질소산화물은 모두 NO 로 가정한다.(질소 산화물의90%이상을 차지한다.)

디젤 엔진의 배기가스 유량과 NO_x 의 배출량은 실험을 통해 계측을 하였고 이를 통해 배기가스 중의 NO_x 몰 유량을 구할 수 있다.

$$\text{DeNO}_x = Q_{m,\text{ext}} V_{\text{NO}_x} / M$$

계산된 $\text{DeNO}_x = 8.49 \times 10^{-3} \text{ mol/s}$ 이며 SCR 표준 반응으로 NO_x 와 NH_3 사이의 반응 계수는 1:1이다. 따라서 필요한 암모니아 가스의 몰 유량 DeNH_3 는 $8.49 \times 10^{-3} \text{ mol/s}$ 이다. 요소의 열분해와 수분해 반응으로 인해 1mol 요소가 2mol 암모니아 가스를 생성할 수 있다. 따라서 필요한 요소 유량은 식 (3.29)로 구할 수 있다.

$$\text{DeUrea}=0.5\text{DeNH}_3=4.25\times 10^{-3} \text{ mol/s}$$

요소 질량은 60g/mol 이므로 필요한 요소 질량 유량을 식 (3.30)으로 구할 수 있다.

$$Q_{\text{Urea}}=\text{DeUrea}\times M=4.25\times 10^{-3}\times 60=2.547\times 10^{-4} \text{ kg/s}$$

요소수의 질량 농도가 40%이기 때문에 요소수의 질량 유량은 약 $6.37\times 10^{-4} \text{ kg/s}$ 이다.

(2) 요소수 분무 모델 설정

노즐의 구조와 지름은 분무 형태와 액체 방울의 치수를 결정하여 SCR 시스템의 탈질 성능을 결정하기 때문에 중요한 요소이다. 일반적으로 SCR 시스템의 노즐은 배기관 중앙에 위치하고 본 연구에서도 마찬가지이다. 노즐의 홀은 배기가스의 유동과 반대 방향으로 세팅하여 분사되도록 하였다. 이는 배기가스의 유동 방향과 반대 방향이므로 암모니아의 생성에 도움을 줄 수 있을 것으로 판단된다. 노즐 홀의 수는 단공, 분사 홀의 지름은 0.5mm이다. 요소수는 25℃로 공급되며 분사된 주위의 배기가스 온도는 340℃이다. 분사는 지속적이며 단공을 통한 분사 각도(Cone Angle)는 45°이다. Table 3.에 노즐의 모델링과 관련된 조건을 나타내었다.

Tab, 3.2 Parameters of nozzles model

Variables	Unit	Value
노즐 위치	mm	X=0, Y=-1200, Z=1950
분사 방향	-	X=0, Y=1, Z=0
분공 수	개	1
분공 지름	mm	0.5
분사 각	degree	45
요소 수 용액 유량	kg/s	6.37×10^{-4}
분사 온도	°C	25
분사 속도	m/s	20

3.2.4. 촉매 모델링

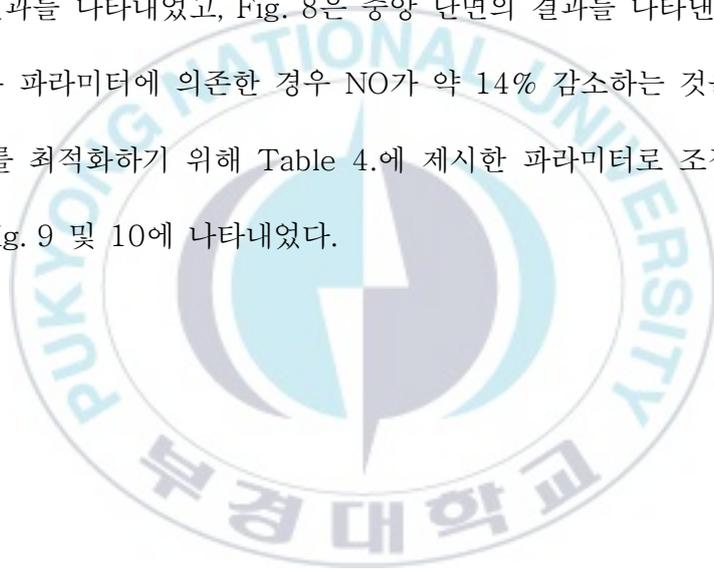
먼저 물질 수송 모델과 부피 반응에 대해 설정한다. ANSYS에서 물질 옵션 중 urea-water-air를 선택하고 데이터베이스에 Table 2.에 제시한 각종 배기가스 성분을 입력했다. 화학 반응 메커니즘 설정에서는 설정 반응 건수를 3으로 하였다. 여기서는 암모니아 분해와 표준 SCR 반응만을 고려하고, 나머지 반응을 무시하였다. 탈질 반응은 체적 반응으로 한다고 가정하였다. Stoieh Coefficient와 Rate Exponent 구역에서 반응물과 생성물을 설정하는 화학 계량 계수와 속도 지수, Arrhenius Rate의 Arrhenius 속도 인자와 활성화 에너지를 정의된 값으로 입력하였다.

가야호 SCR 시스템의 촉매에 대해서는 시험 평가를 실시하지 않았기 때문에 촉매 모델을 제시할 수 없었다. ANSYS의 기본 파라미터를 적용한 뒤 파라미터를 조정하여 최적화된 촉매 성능을 도입하였다.

먼저 요소수 분사시키고 난 뒤 암모니아의 생성에 대해 수치해석을 하였고 SCR 시스템 내 암모니아 분포에 대한 결과를 Fig. 5와 6에 나타내었다. 여기서는 NO와의 반응은 없다고 가정하였다. Fig. 5는 배기관 표면의 결과를 나타내었고, Fig. 6은 중앙 단면의 결과를 나타낸다. 1과 2 지역 사이에서 요소수가 분사되었고 그 주변에서 급격하게 암모니아가 증가하여 촉매

전 단계까지 지속적으로 퍼져 나가는 것을 확인하였다. 한 가지 언급할 사실은 배기가스의 총 질량은 요소수 분사 전후로 달라진다는 것이다. 이는 질량 분율이 요소수 분사 전후로 달라질 수 있음을 의미한다.

Fig. 7과 8에는 촉매 모델을 최적화를 위해 실시한 기본 파라미터에 의한 SCR 시스템 내의 NO 분포를 나타내고 있다. 마찬가지로 Fig. 7은 배기관 표면의 결과를 나타내었고, Fig. 8은 중앙 단면의 결과를 나타낸다. 촉매 모델을 기본 파라미터에 의존한 경우 NO가 약 14% 감소하는 것을 알 수 있었다. 이를 최적화하기 위해 Table 4.에 제시한 파라미터로 조정된 경우의 결과를 Fig. 9 및 10에 나타내었다.



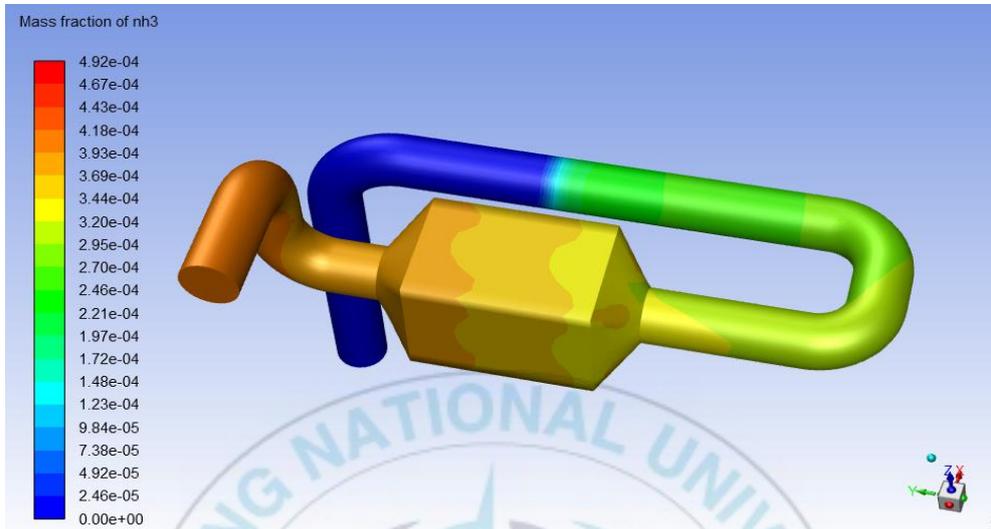


Fig. 5. Mass fraction of NH3 on surface of SCR system without reaction

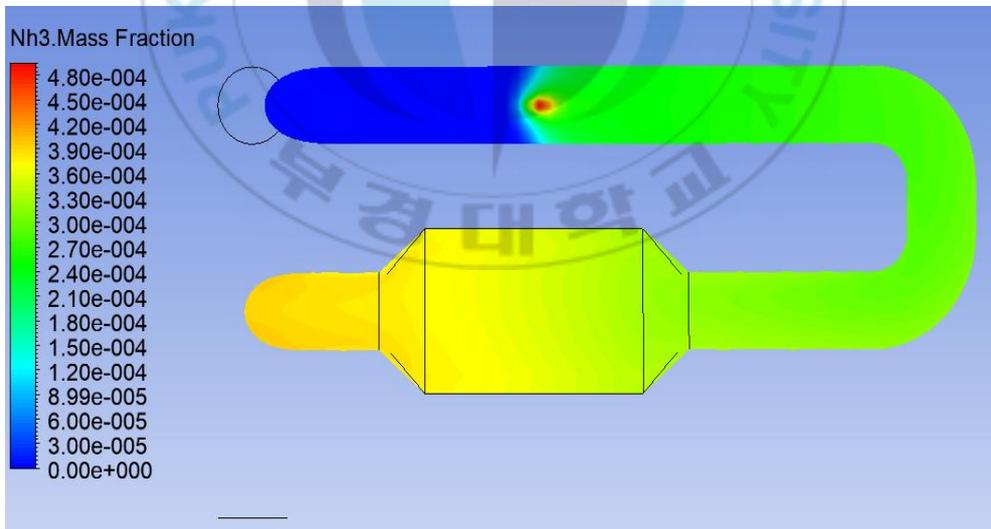


Fig. 6. Mass fraction of NH3 on cross section of SCR system without reaction

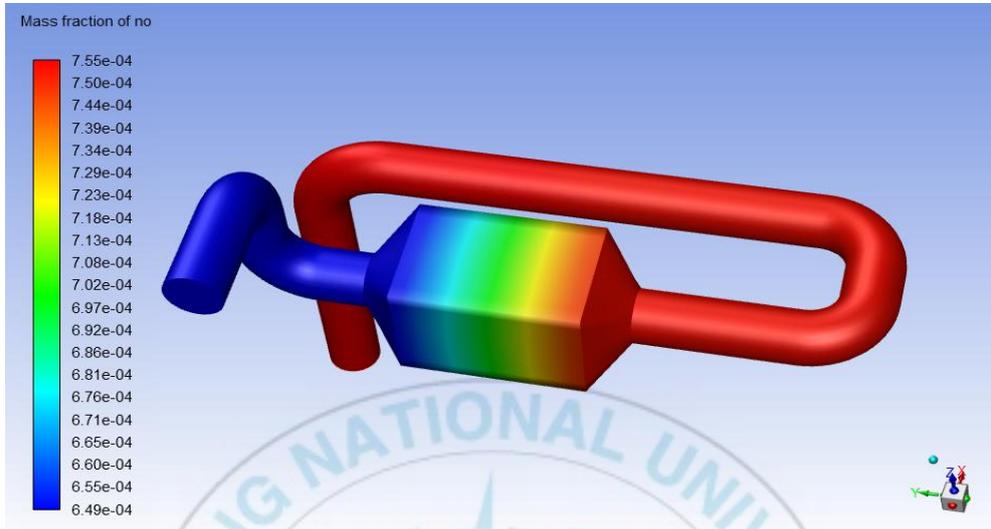


Fig. 7. Mass fraction of NO on surface of SCR system with default parameter

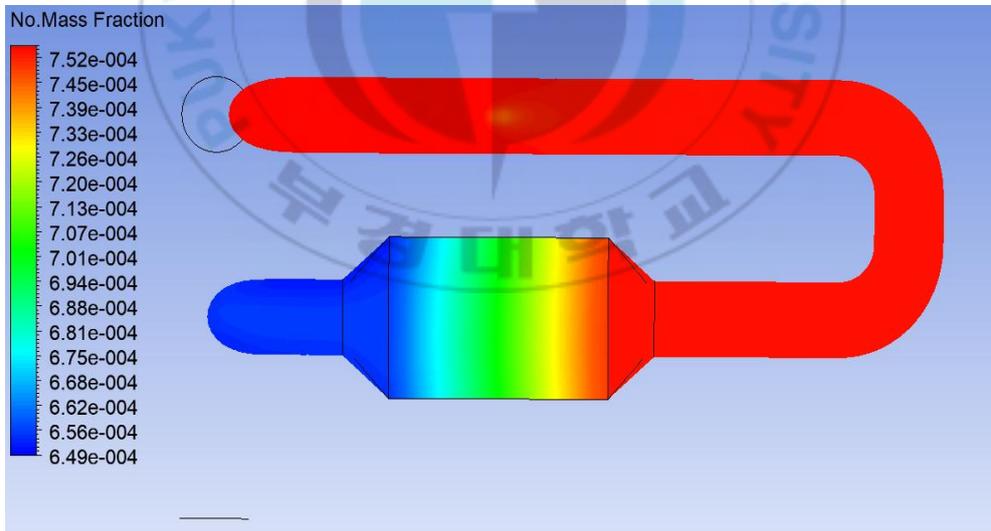


Fig. 8. Mass fraction of NO on cross section of SCR system with default parameter

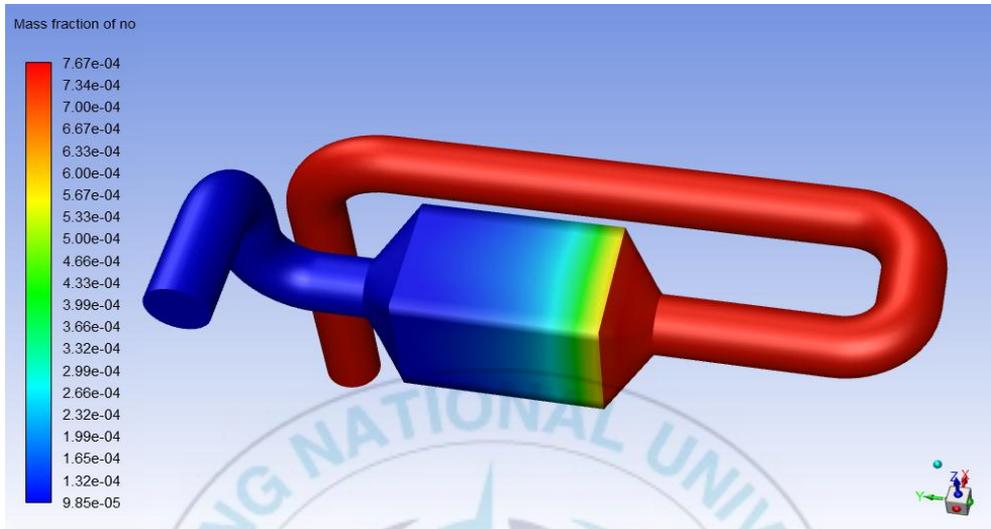


Fig. 9. Mass fraction of NO on surface of SCR system with optimized parameter

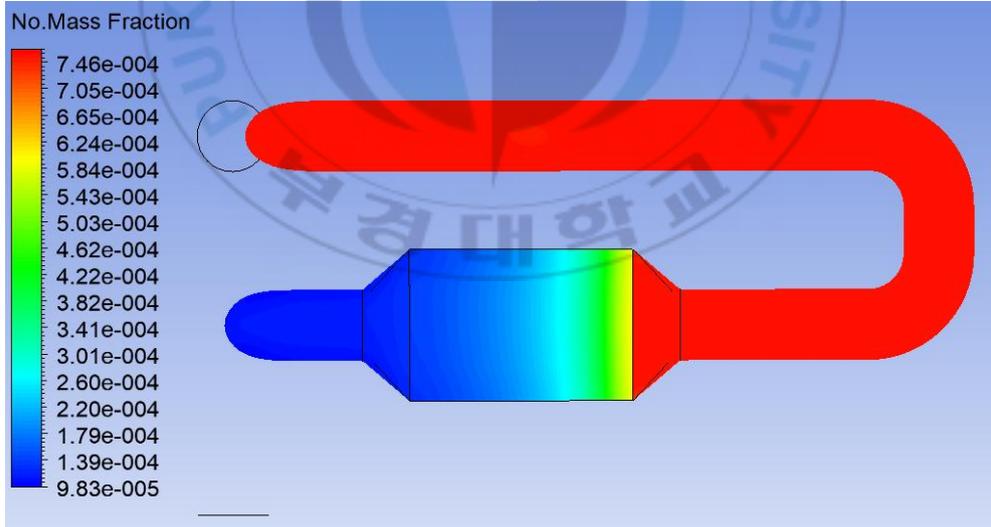


Fig. 10. Mass fraction of NO on cross section of SCR system with optimized parameter

Table 4.에 각 파라미터의 기본값과 최적값을 나타낸다. 여기서 말하는 최적값은 Table 5.에 나타낸 NO 탈질율이 가야호 SCR 시스템의 실험 결과값에 근사하는 것을 의미한다. 따라서 Table 4.의 최적값을 바탕으로 촉매 모델을 설정하고 유동해석을 실시한다.

Table 4. Comparison of parameters between default and optimized value

Parameters	Default value	Optimized value
Pre-Exponential Factor of Ammonia pyrolysis	1e+15	1e+15
Activation Energy of Ammonia pyrolysis (j/kgmol)	100	100
Pre-Exponential Factor of Isocyanate hydrolysis	2.5e+05	2.5e+05
Activation Energy of Isocyanate hydrolysis (j/kgmol)	6.222e+07	6.222e+07
Pre-Exponential Factor of standard SCR reaction	1e+15	5e+13
Activation energy of standard SCR reactions (j/kgmol)	1e+08	6.5e+07

Table 5. Comparison of denitrification rate according to each value

	NOx in	NOx out	Denitrification rate (%)
Default value	0.000755	0.000666	11.93
Optimized value	0.000755	0.000112	85.16
Test value	0.000755	0.000114	84.92

3.3. SCR 시스템 유동 실험 방법

Fig. 11.에는 가야호에 탑재된 SCR 시스템의 반응기 모습과 제어기 화면을 나타내었다. Fig. 12.에는 배기관에서 온도 및 압력을 측정할 위치를 나타내고 있다. ①은 SCR 시스템으로 배기가스가 곡관을 지나 들어오는 위치이고, ②는 배기가스에 요소수가 분사된 이후 곡관부 앞에 위치한다. 즉, ①과 ② 사이에 요소수를 분사하는 노즐이 장착되어 있다. ③은 곡관부를 지나 반응기에 들어가기 전의 위치이며 ④는 반응기를 지난 후이다. 앞서 유동해석을 위해 설명한 그림과 같은 위치이다^[4].

온도의 측정은 K-type 열전대를 각 위치에서 상중하 3곳으로 설치하여 총 12개의 온도 값을 측정하였다. 열전대는 National instruments사의 cDAQ-9174와 NI 9213의 16채널 온도측정 모듈을 이용하여 컴퓨터와 연결시켰다. 그리고 LabView를 활용하여 1초마다 각각의 온도를 동시에 측정하도록 프로그램을 코딩하여 컴퓨터에 저장하였다.



Fig. 11. Picture of SCR system in Kaya ship

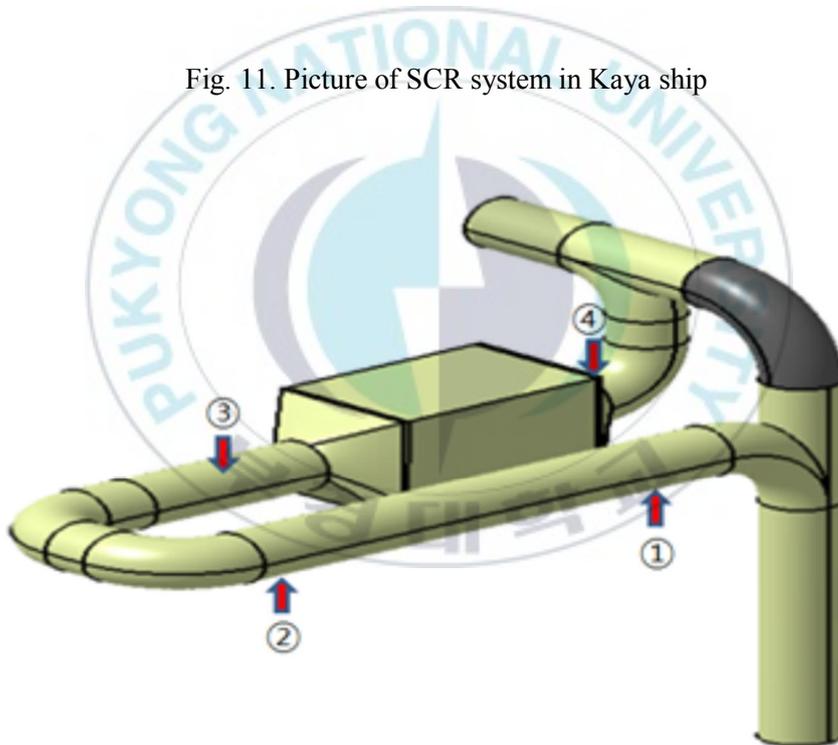


Fig. 12. Schematic diagram of experiment

4. 실험 결과 및 고찰

4.1. 질량 분율 해석 결과

Fig. 13과 14는 전체적인 모델링에 따른 NH_3 의 질량 분율 변화에 대한 배기관 표면과 단면의 결과를 나타내고 있다. 요소수 분사 이후 촉매 전까지 암모니아의 질량이 증가하다가 촉매가 있는 반응기에서는 질소산화물과의 반응으로 대부분 질소로 환원되며 배기가스로 배출되는 양은 거의 0이 된다. 이는 암모니아의 슬립을 10ppm 이하로 규정하고 있는 법규와도 잘 일치하는 것을 나타낸다. 따라서 실제 실험값에서도 암모니아는 거의 0을 나타내고 있어 실험값과 잘 일치하는 것으로 판단된다.

Fig. 15 및 16에는 H_2O 의 질량 분율 변화에 대한 배기관 표면과 단면의 결과를 나타내고 있다. 요소수에는 60%의 물이 포함되어 있기 때문에 당연히 배기가스 내의 물의 질량 분율이 증가하여야 한다. 수치해석 결과 요소수 분사에 의해 물의 질량 분율이 $8.10\text{e}-02$ 에서 $8.25\text{e}-02$ 로 약 2% 증가하였다.

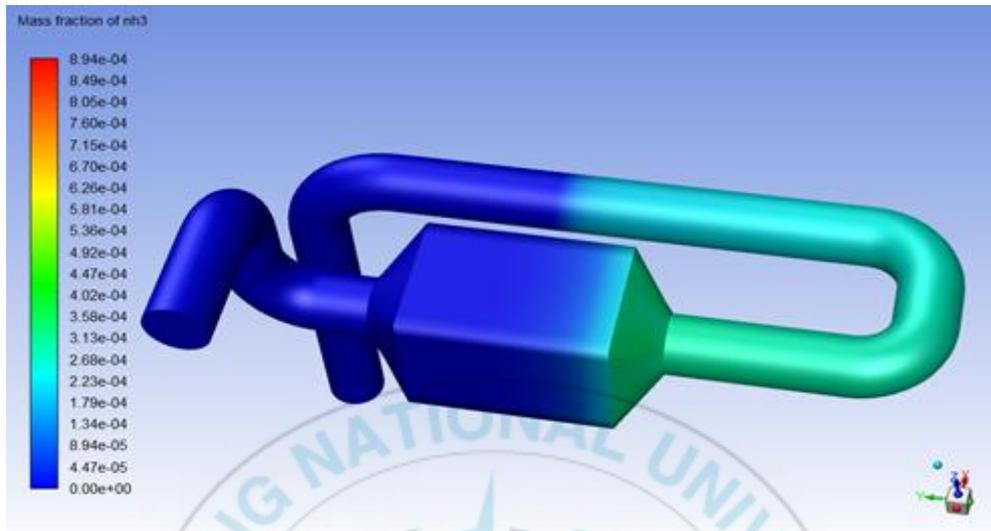


Fig. 13. Mass fraction of NH₃ on surface of SCR system with reaction

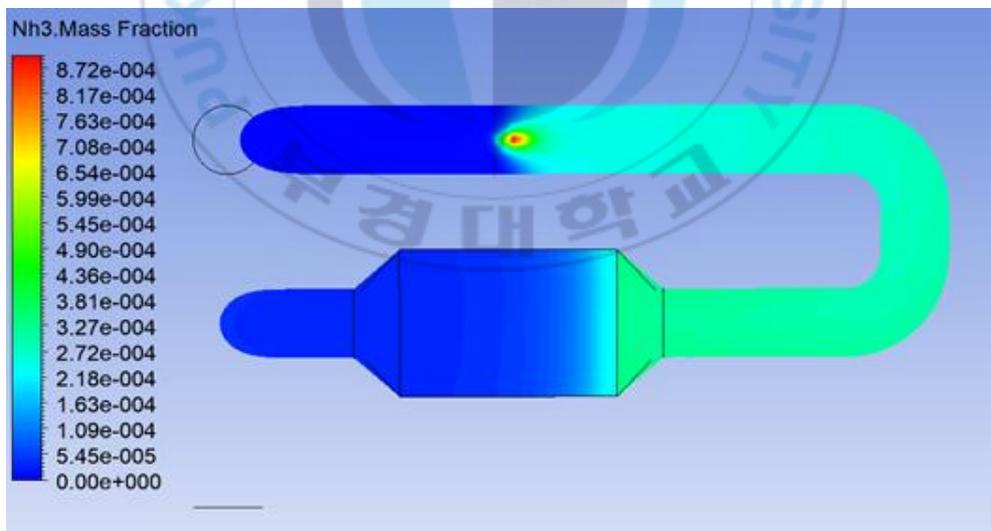


Fig. 14. Mass fraction of NH₃ on cross section of SCR system with reaction

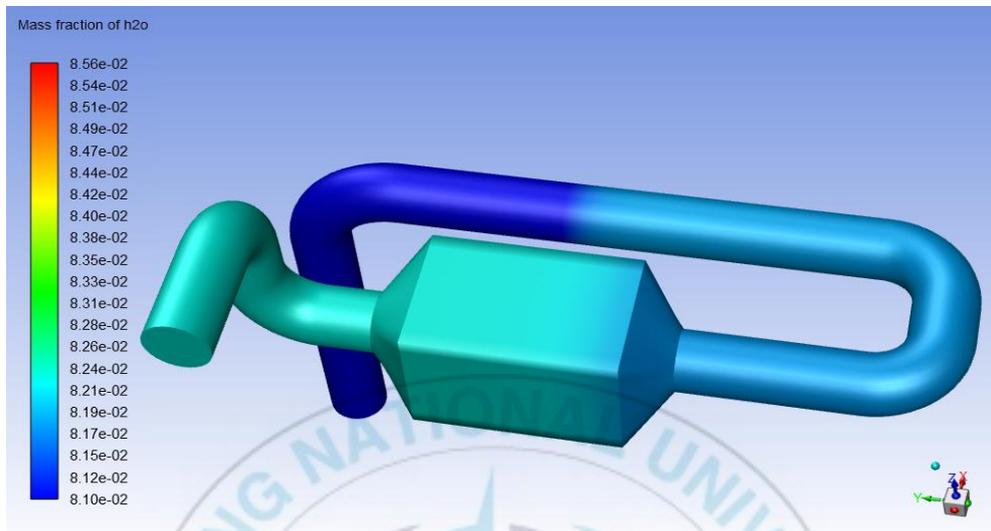


Fig. 15. Mass fraction of H₂O on surface of SCR system with reaction

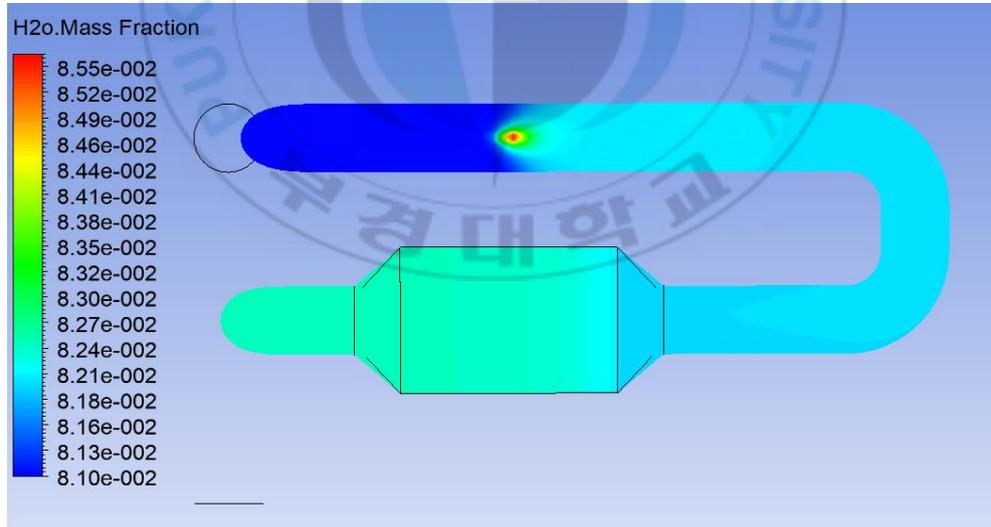


Fig. 16. Mass fraction of H₂O on cross section of SCR system with reaction

Fig. 17과 18에는 O_2 의 질량 분율 변화를 위한 배기관 표면과 단면의 결과를 나타내고 있다. 산소는 질소로의 환원 반응 중 표준 반응과 기타 반응과 같이 식 (2.4), (2.7), (2.8) 에 사용되므로 감소하게 된다.

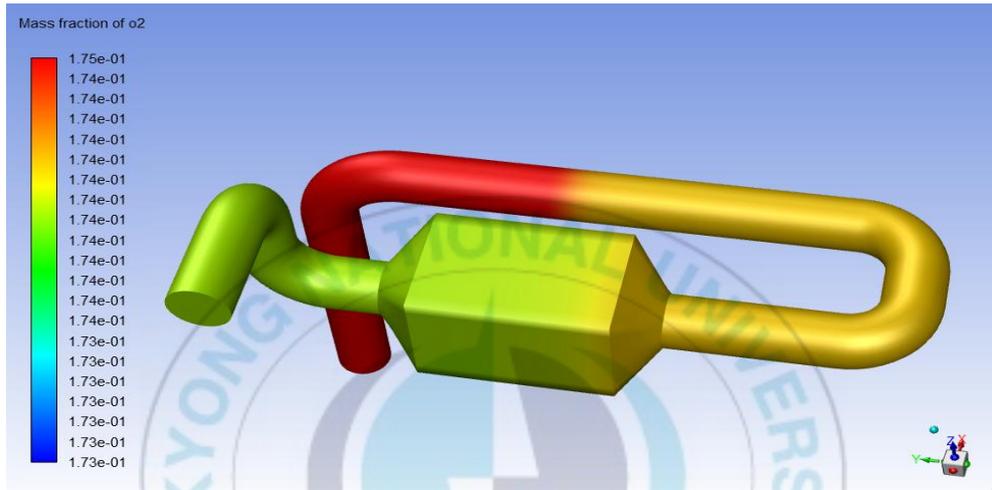


Fig. 17. Mass fraction of O_2 on surface of SCR system with reaction

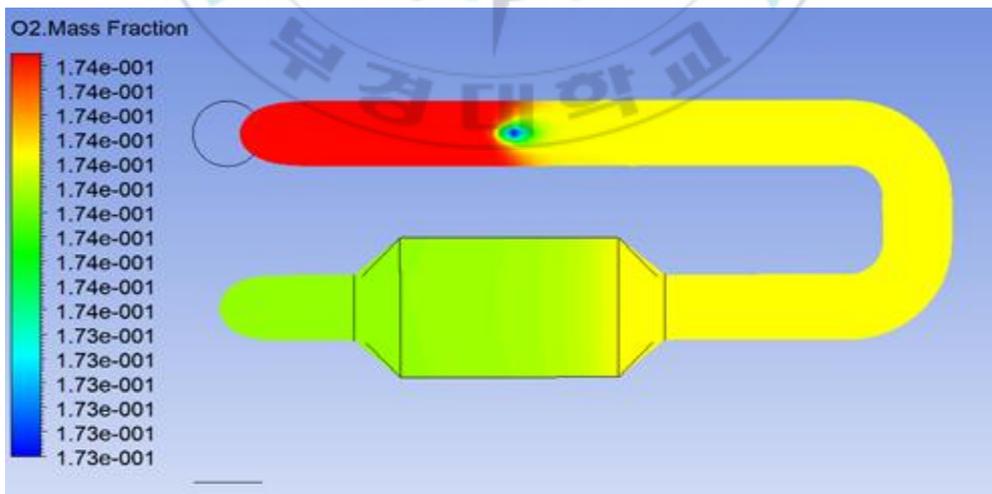


Fig. 18. Mass fraction of O_2 on cross section of SCR system with reaction

Fig. 19와 20에는 N_2 의 질량 분율 변화에 대한 배기관 표면과 단면의 결과를 나타내고 있다. 질소의 질량 분율이 입구에서는 $6.95e-01$ 로 나타나고 있으나 출구에서는 조금 더 낮은 $6.94e-01$ 로 줄어들었다. 즉, 질소산화물이 질소로 환원되었으나 입구보다 출구에서의 질소의 분율이 작게 나타나고 있다. 그 이유는 앞서 설명한 것처럼 배기가스의 총 질량이 요소수 분사 이후 증가하였기 때문에 실질적으로는 질소의 총 질량은 증가하였으나 배기가스 총 질량에 대한 비율은 감소한 것으로 나타나기 때문이다.

Fig. 21과 22에는 CO_2 의 질량 분율 변화에 대한 배기관 표면과 단면의 결과를 나타내고 있다. 이산화탄소의 질량 분율은 $4.89e-02$ 에서 $4.93e-02$ 로 늘었다. 이는 분사된 요소수가 암모니아로 변화될 때 생성되는 $HNCO$ 가 분해되면서 CO_2 로 변화되는 식 (2.4) 에 기인한다. 이산화탄소는 약 1% 증가하였다. 이 자료는 추후 SCR 시스템을 통해 증가하는 이산화탄소의 배출이 에너지 효율 설계 지수(EEDI: Energy Efficiency Design Index)에 미치는 영향에 대해서 연구를 진행할 필요가 있을 것으로 사료된다.

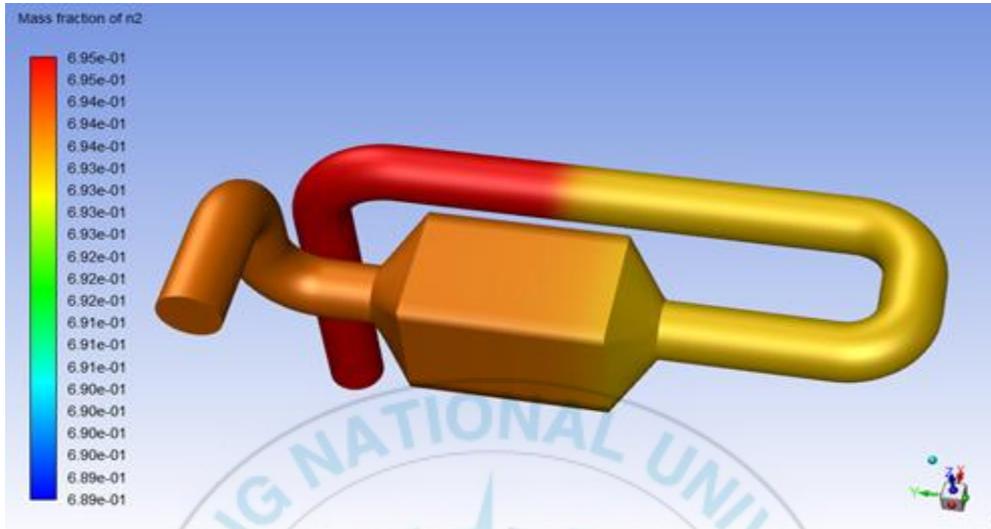


Fig. 19. Mass fraction of N_2 on surface of SCR system with reaction

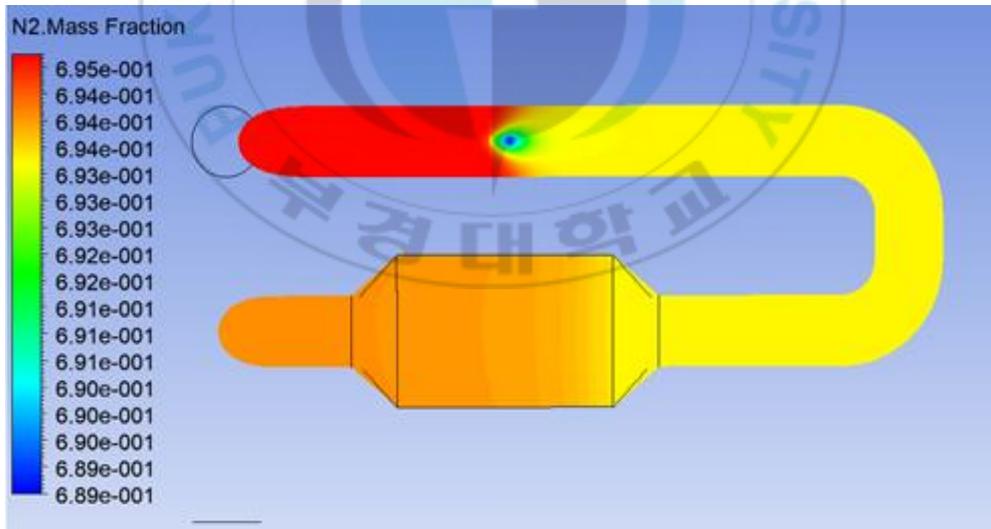


Fig. 20. Mass fraction of N_2 on cross section of SCR system with reaction

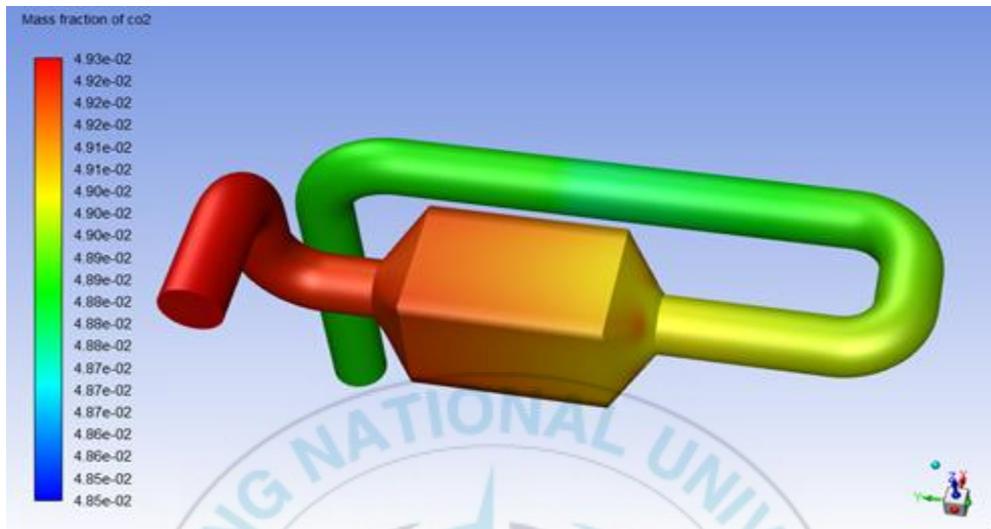


Fig. 21. Mass fraction of CO₂ on surface of SCR system with reaction

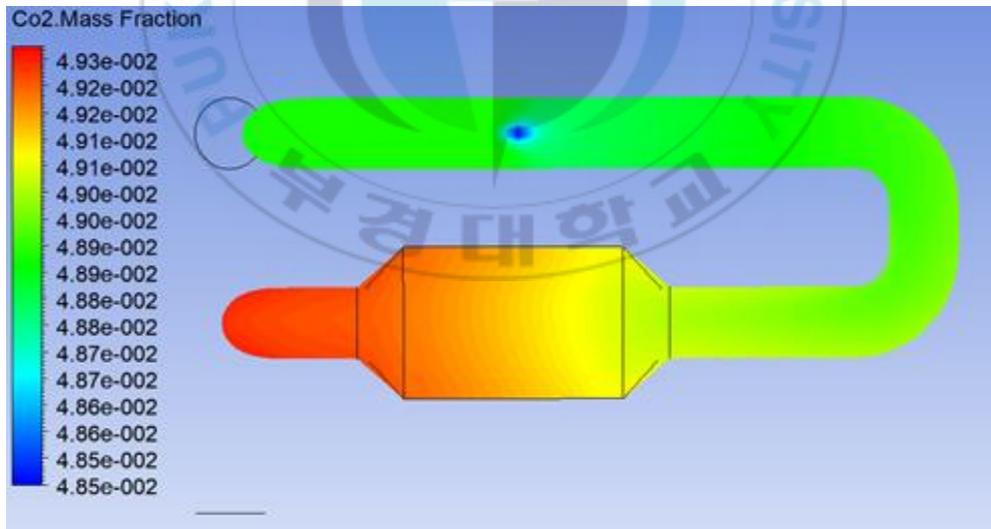


Fig. 22. Mass fraction of CO₂ on cross section of SCR system with reaction

4.2. SCR 시스템의 온도 분포

Fig. 23와 24에는 배기관 표면과 단면에 있어서의 온도 분포에 대한 결과를 나타내고 있다. 수치해석을 실행할 때 SCR 시스템은 단열 상태로 외부와의 열 교환은 없는 것으로 가정하였다. 입구에서의 배기가스 온도는 340°C이고, 요소수의 분사가 있는 곳부터는 약 334°C 정도로 6°C가 감소하였다가 반응기 이후로는 342°C로 다시 8°C가 증가하였다. 이는 2장에서 설명한 것처럼 요소수로부터 암모니아가 분리되는 반응식 (2.1)과 (2.2)가 흡열반응이기 때문에 배기가스 온도가 감소한 것으로 추정된다. 또한 질소산화물의 환원반응인 식(2.4) 및 (2.5)는 발열반응이기 때문에 반응기 이후에는 온도가 증가한 것으로 사료된다.

Fig. 25에는 가야호 발전기 SCR 시스템을 2시간 동안 가동하면서 실측한 온도 변화를 나타내고 있다. 선박의 발전기는 부하의 변동이 있기 때문에 일정하게 유지하기 어려우나 2시간 동안 4개 위치에서의 온도 변화를 측정하기에는 무리가 없었다. 대략적으로 1번 위치에서 2번 위치와는 약 9°C의 차이가 있었고, 2번과 3번은 약 3°C, 3번과 4번의 차이는 역으로 4°C 정도의 차이가 있었다. 실험값과 수치해석 값을 비교한 결과를 Fig. 26에 나타내었다. 수치해석 결과 값이 실제 실험값보다 조금 높고 차이도 크게 나

타났다. 그 이유는 단열로 가정하였고, 정확한 요소수의 분사량, 배기관 내의 유동에 대한 오차 등을 고려하지 않았기 때문으로 사료된다. 그러나 경향만을 따졌을 때는 유사한 모습을 나타내고 있어 열전달에 관한 조건을 좀 더 실험 상황에 가깝게 고려한다면 더욱 실험값에 가까운 수치해석을 할 수 있을 것으로 사료된다.



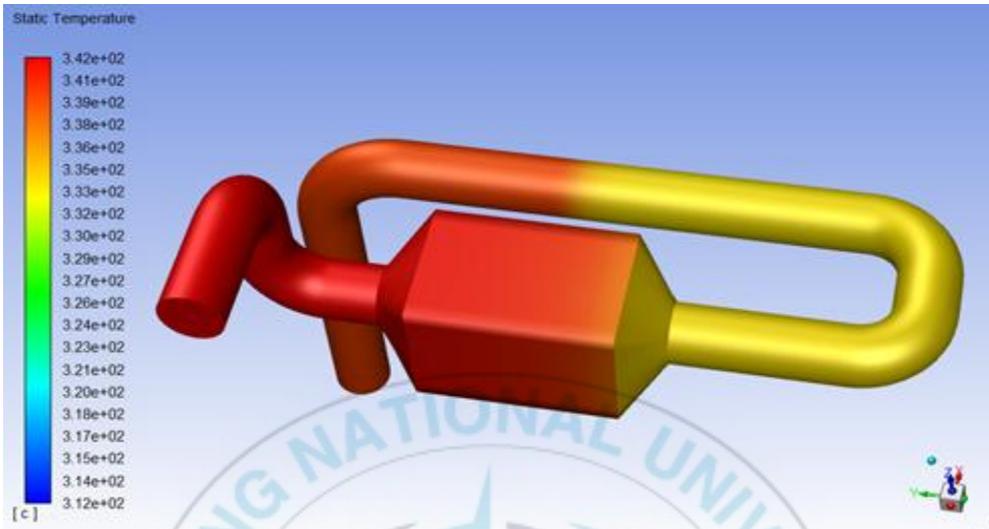


Fig. 23. Temperature distribution on surface of SCR system with reaction

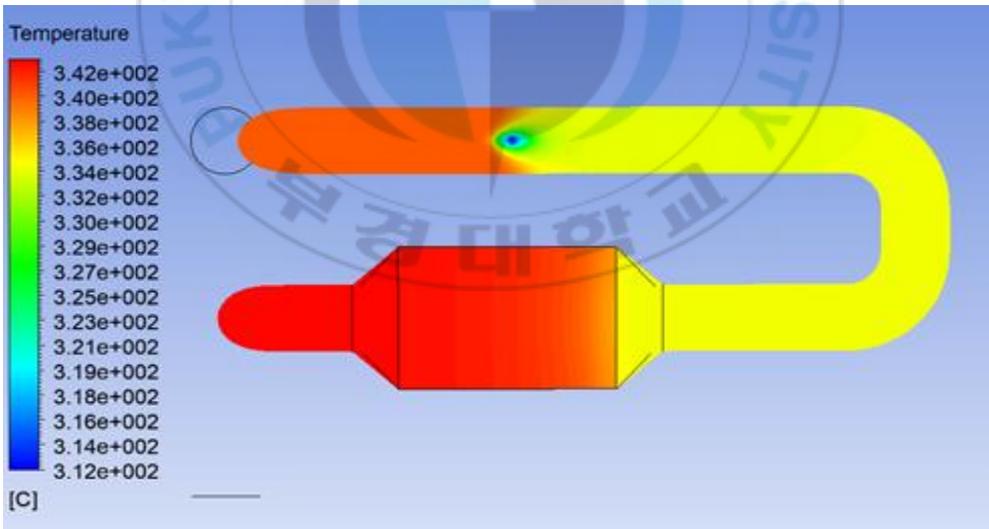


Fig. 24. Temperature distribution on cross section of SCR system with reaction

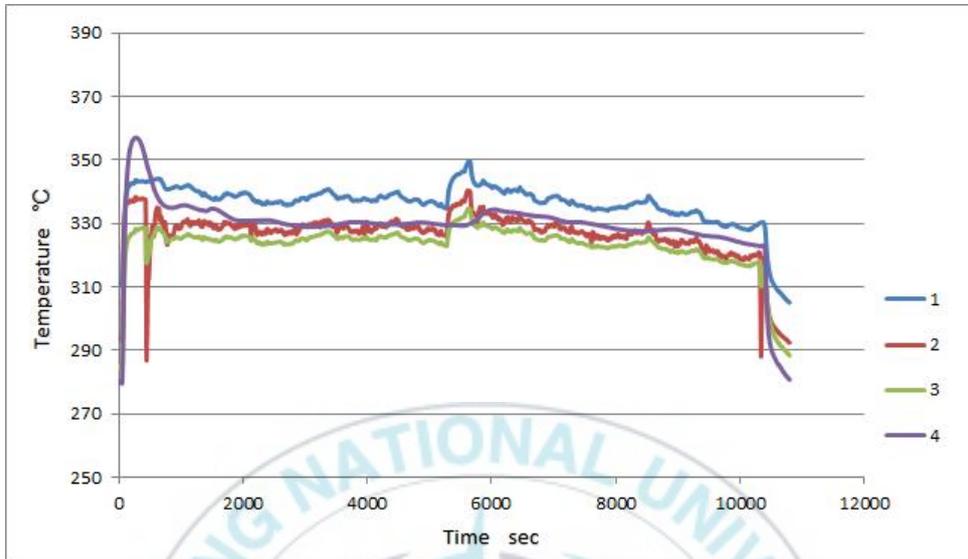


Fig. 25. Exhaust gas temperature on SCR system according to time



Fig. 26. Comparison of exhaust gas temperature on SCR system between experimental and CFD data

5. 결 론

본 연구는 강화되어 가는 MARPOL 협약의 질소산화물 규제인 TIERIII에 대응하는 장비인 SCR 시스템의 유동특성 중 화학 반응을 더 하여 배기가스의 질량 분율과 온도 분포를 수치해석 하였다. 앞선 연구에서 부경대학교 실습선 가야호의 발전기 엔진에 SCR 시스템을 장착하기 위하여 배기 유동특성을 검토하였으나 요소수의 분사와 화학 반응 등은 고려되지 않았다. 본 연구에서는 이러한 요소들을 CFD 해석에 반영하여 배기가스 내 성분들의 질량 분율과 4개 위치에서의 온도 변화에 대해서 살펴보았다. 종합적인 결과는 다음과 같다.

- 1) 요소수 분사 모델 및 화학 반응 모델을 첨가하여 더욱 정밀한 배기가스 성분에 대한 수치해석이 가능하였다.
- 2) ANSYS의 유저 인터페이스를 이용하여 정보가 없던 촉매에 대한 모델링이 가능하였고, 실측과 비슷한 NO_x 환원율을 확보하였다.
- 3) 암모니아는 실험값과 일치하게 거의 0를 배출하였다. 수증기의 경우 요소수에 포함된 만큼 질량 분율이 증가하였다. 산소는 질소로의

환원 반응에 사용되므로 감소하였다. 실질적인 질소의 총 질량은 증가하였으나 배기가스 총 질량에 대한 비율로 감소한 것처럼 보였다. H₂CO가 분해되면서 이산화탄소는 증가하였다.

- 4) 배기가스 온도에 있어서 실험값과 수치해석 결과값에는 4구역 모두 약간의 차이가 있었다. 그러나 요소수 분사에 따른 온도 하강, 반응기 이후의 온도 증가와 같은 경향은 같이 나타났다.



참고 문헌

- 1) H. K. Park et. al., Development of a charge air moisturiser system for NO_x reduction of a medium-speed diesel engine, CIMAC 2007, paper number 122, 2007
- 2) K. Imai et. al, Development of NIIGATA new medium-speed diesel engine “28AHX” , CIMAC 2010, paper number 165, 2010
- 3) F. Koch et. al, Development Strategies for High Speed Marine Diesel Engines, CIMAC 2010, paper number 248, 2010
- 4) 황성철, 선박용 탈질설비의 구성 및 공극률에 따른 배기 유동특성, 학위논문, 부경대학교 대학원, 2017
- 5) K. Maeda, Development of NO_x Reduction System that Combines an Oxygen Reduction Membrane with Water Mixed Fuel, CIMAC 2016, paper number 176, 2016
- 6) K. Sandelin, SCR under pressure - pre-turbocharger NO_x abatement for marine 2-stroke diesel engines, CIMAC 2016, paper number 111, 2016

- 7) C. S. Ryu, The World's First Commercialized Low Pressure SCR system on 2-Stroke Engine, DelNOx System s, CIMAC 2016, paper number 306, 2016
- 8) M. K. Kim, Design of an efficient urea decomposition chamber using urea decomposition catalyst in NoNOx-LP SCR system for 2-stroke engine, CIMAC 2016, paper number 172, 2016
- 9) S. Shaowei, Optimization of NOx-Emission Reduction in Medium-Speed Marine Diesel Engines with SCR-Catalyst, CIMAC 2016, paper number 243, 2016
- 10) H. Korpi, Development of exhaust gas aftertreatment systems applied to modern high efficiency four-stroke medium-speed engines, CIMAC 2016, paper number 97, 2016
- 11) A. Doring, The MAN SCR System – More Than Just Fulfilling IMO Tier III, CIMAC 2016, paper number 26, 2016
- 12) J. Torrkulla, Wartsila SCR development and experience for IMO Tier III, CIMAC 2016, paper number 204, 2016
- 13) J. H. Koo, Performance Investigation on New Developed Maritime SCR Catalysts for Medium Speed Engine, CIMAC 2016,

paper number 64, 2016

- 14) F. Kock, Marine Diesel Engines with SCR: Class Societies' Best Practices, CIMAC 2016, paper number 160, 2016
- 15) LI Jiang-hua, DONG Sheng-xian. Research on Technology for Controlling Ships' Diesel Engines NOx Emission. Equipment Manufacturing Technology No.7,2009.pp32-34,59.
- 16) Nie Jun, Study on the Emission of High-speed Marine Diesel Engine Burning Heavy Fuel Oil. Wuhan University Of Technology, 2011
- 17) Masaaki Okubo et. al, NOx Reduction Aftertreatment System Using Nitrogen Nonthermal Plasma Desorption, IEEE TRANSACTIONS ON INDUSTRY APPLICATIONS, Vol. 41, No. 4, pp. 891-899, 2005
- 18) Masaaki Okubo et. al., Improvement of NOx Reduction Efficiency in Diesel Emission Using Nonthermal Plasma - Exhaust Gas Recirculation Combined Aftertreatment, IEEE, 2010
- 19) Li Yuntao and Zhong Qin, Recent Advances in Mechanisms and Kinetics of Low-Temperature Selective Catalytic Reduction of NOx with NH₃, Progress in Chemistry, Vol. 21, No. 6, pp. 1094-

1100, 2009

20) Miao-Miao Wen, Lin Lu, Xiao-Hong Gao, Modelling of Urea-SCR Exhaust After-treatment System for Diesel. Transactions of Csice, Vol. 27, No. 3, pp. 249-254, 2009

21) Fluent Inc, FLUENT User's Guide. Fluent Inc, 2003

22) Xia Guo-quan, The numerical simulation of two-phase turbulent flow with combustion and chemical reactions in a precalciner, Wuhan University Of Technology, 2005

23) 전해진, SCR 시스템의 믹서 형상에 따른 요소 수용액의 유동 혼합 해석, 석사학위논문, 부경대학교 대학원, 2016

24) Dullien F. A. L, Porous Media-Fluid Transport and Pore Structure, New York, 1979