

Urea-SCR용 스윌 인젝터의 니들 리프트 형상에 따른 유동특성에 대한 연구

곽은조¹, 박성영^{2*}

¹공주대학교 일반대학원 기계공학과, ²공주대학교 기계자동차공학부

Study on the Flow Characteristics of Urea-SCR Swirl Injector according to the Needle Lift Profile

Eun-Jo Gwak¹, Sung-Young Park^{2*}

¹Mechanical Engineering, Graduate School, Kongju National University,

²Div. of Mechanical & Automotive Engineering, Kongju National University

요약 본 논문에서는 요소수를 적용하는 SCR 인젝터의 내부유동에 대한 전산 유동해석을 수행하였다. 유동해석에 적용된 인젝터는 경사진 노즐과 스윌디스크를 갖는 스윌타입의 단홀 인젝터이다. 인젝터 니들의 최대 리프트 및 열림 속도를 인젝터의 설계 변수로 선정하였다. 비정상 상태로 작동하는 노즐 내부의 유동 특성을 해석하기 위하여, 움직이는 물체에 적용이 가능한 Moving Grid 기법을 적용하여 정밀한 인젝터 니들의 움직임을 모사하였다. 유동해석 결과, 인젝터 니들의 속도가 증가할수록 출구를 통한 요소수 유량은 감소하는 것으로 나타났다. 이는 인젝터 니들의 속도가 빨라질수록, 인젝터 니들 하부의 빈 공간을 채우려는 유량이 증가하고, 이러한 요소수 유량의 증가가 노즐 출구로 방출되는 유량의 감소를 유발하게 된다. 요소수 유동이 인젝터 노즐에서 출구 쪽으로 진행할수록, 스윌 유동은 감소하였다. 이는 유동과 노즐 벽면과의 마찰에 기인한 것으로 사료된다. 또한, 최대 리프트 유지기간에서, 니들 리프트가 높을수록 스윌 계수와 평균 스윌 계수가 증가하는 경향을 보였다. 본 연구의 결과는 관련된 Urea-SCR 인젝터의 기본 설계 자료로 활용될 수 있을 것이다.

Abstract In this study, a computational simulation of the internal flow characteristics was carried out for a Urea-SCR Injector. A single hole swirl injector with a swirl disk and slanted nozzle was used in this simulation. The maximum needle lift and opening velocity were selected as the design parameters. To analyze the unsteady internal flow characteristics of the Urea-SCR injector, the moving grid technique was applied to simulate the delicate needle movement. According to the simulation results, the injected mass flow rate from the Urea-SCR injector decreased with increasing needle opening velocity and maximum needle lift. This is because the Urea-solution tends to fill the empty space that the needle previously occupied. The swirl flow is decreased as the flow goes through the injector nozzle, because of the friction with the nozzle wall. Also, during the maximum needle lift period, the swirl coefficient and mean swirl coefficient increase with increasing needle lift. The results of this study may be used as the basic design data of related injectors.

Keywords : Computational smulation, Injector, Internal flow, Moving grid, Urea-SCR

1. 서론

최근 강화되는 자동차 배기가스 환경규제에 대응하기

위해 완성차 업체를 비롯한 자동차 업계에서는 많은 연구가 수행되고 있다. 디젤기관은 불꽃점화 엔진에 비해 연료의 효율이 높아 중대형 엔진부터 SUV 및 승용차의

이 논문은 2014년 공주대학교 학술연구지원사업의 연구비 지원에 의하여 연구되었음.

*Corresponding Author : Sung-Young Park(Kongju National Univ.)

Tel: +82-41-521-9275 email: sungyoung@kongju.ac.kr

Received March 28, 2016

Revised April 15, 2016

Accepted June 2, 2016

Published June 30, 2016

엔진까지 폭넓게 적용되고 있다. 디젤 엔진의 배기가스의 유해 배출물질 중 PM의 경우 DPF(Diesel Particulate Filter)의 기술 발달로 90%이상 저감 가능한 것으로 보고되고 있다[1-3]. 반면 질소산화물(NOx)은 LNT(Lean NOx Traps), LNC(Lean NOx Catalysts), 그리고 SCR(Selective Catalytic Reduction) 등과 같은 후처리 시스템을 통하여 저감할 수 있다. 이러한 기술 중 Urea-SCR System은 높은 NOx 정화효율로 실제 상용 엔진을 대상으로 적용되고 있으며, 강화되는 배기 규제를 만족시키기 위하여 승용 엔진에도 적용될 것으로 예상된다[4-6].

Urea-SCR System을 후처리 시스템에 장착하기 위해서는 Urea-SCR 인젝터 성능의 정확한 예측이 선행되어야 한다. Dosing-System의 핵심 부품인 Urea 인젝터의 성능은 질소산화물 저감에 지배적인 영향을 미치는 것으로 알려져 있으며, 인젝터의 위치와 형상, 분사압, SCR 촉매 입구형상 등에 대한 많은 연구가 수행되었다[6-7]. 그러나 Urea-SCR 인젝터의 성능에 대한 분석 및 내부유동 특성에 대한 연구는 매우 부족한 실정이다[8].

본 연구에서는 저압 분사에서도 미립화 특성이 우수한 스윌타입 Urea-SCR 인젝터의 내부유동에 대한 전산 유체 해석을 수행하였다. 양산되고 있는 인젝터에 대하여 내부유동 특성을 분석하였으며, 니들의 움직임에 따른 Urea-Solution의 유량특성과 스윌 특성을 분석하였다.

2. 본론

2.1 인젝터

본 연구의 대상모델인 Urea SCR용 스윌 인젝터의 내부구조를 역설계를 통하여 3D 모델링을 수행하였다. 인젝터는 양산되고 있는 Urea SCR용 Single hole 스윌 인젝터이며, 노즐 직경은 250 μm이다. 모델링된 인젝터의 형상은 Fig. 1.과 같다. 이 인젝터에서 스윌을 발생시키는 스윌 디스크는 인젝터 끝단, 노즐홀 직전에 위치한다. 이 스윌 디스크는 6개의 관로를 통하여 연료 유동에 강력한 스윌을 형성시키는 역할을 한다. 인젝터의 유로와 스윌 디스크의 형상은 Fig. 2.와 같다.

본 연구에서는 인젝터의 분사량에 지배적인 영향을 미치는 노즐부위를 위주로 해석을 진행하기 위하여 인젝터의 상단부는 유동해석에서 제외 하였다.

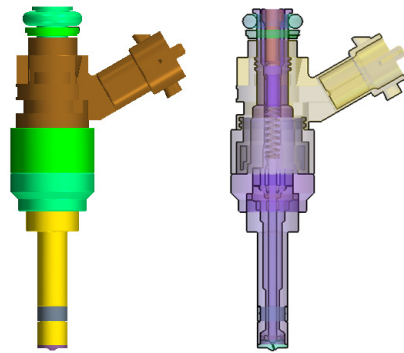


Fig. 1. Urea-SCR swirl injector

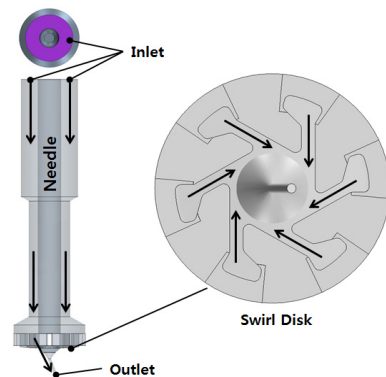


Fig. 2. Flow passage and swirl disk of the injector

2.2 해석방법 및 경계조건

본 연구에서는 상용 소프트웨어인 STAR-CCM+ [9]를 이용하여 해석을 수행하였으며, 난류 모델은 Standard k-e Turbulence model을 이용하였다. 유동영역의 입출구 조건으로 입구압력은 700 kPa, 노즐 출구압력은 대기압으로 설정하였다. Urea-Solution은 물과 유사한 물리적 특성을 갖기 때문에 본 연구에서는 물로 설정하였다 [7]. 니들의 움직임을 모사하기 위하여, Moving Grid Technique를 적용하였다. 니들 구동 초기에는 약 130만 개의 Hexahedral mesh(육면체 해석격자)를 적용하였으며 니들의 움직임에 따라 최대 300만개의 격자가 자동으로 생성되어 계산이 진행 되도록 구성하였다. 또한 벽법칙을 적용하기 위하여 5개의 Prism Layer격자를 구성하였다.

2.3 내부유동해석 변수 설정

본 연구에서 Urea 인젝터의 내부유동특성을 분석하기 위하여 니들 프로파일을 설계변수로 설정하여 유동해

석을 진행하였다. Fig. 3. (a)는 각 모델의 최대 니들 리프트 형상을 보여주고 있다. 모델은 인젝터의 상승 및 하강 기간을 동일하게 하기위하여 니들의 속도를 변경하였으며, 인젝터 니들 리프트를 변경한 모델의 니들 프로파일은 Fig. 3. (b)에 나타내었다. Table 1.은 각 모델에 대한 최대 니들 리프트를 보여준다.

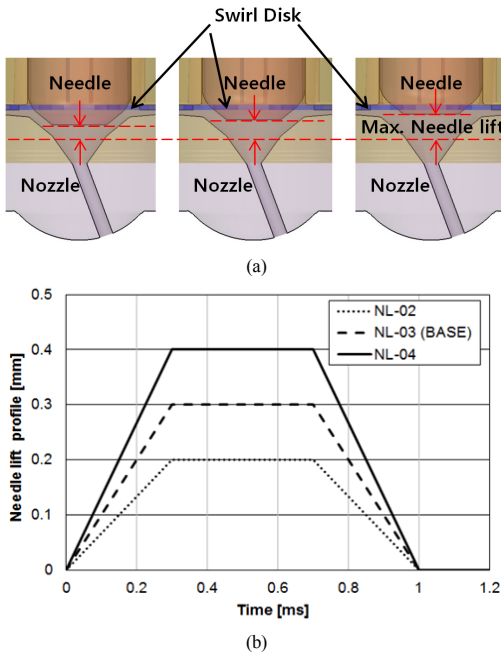


Fig. 3. Design parameters
(a) Maximum needle lift
(b) Needle lift profile

Table 1. Maximum needle lift

Model No.	Max. Needle Lift (mm)
NL-02	0.2
NL-03 (Base Model)	0.3
NL-04	0.4

2.3 해석결과 및 고찰

2.3.1 유동특성 분석

유동해석의 신뢰성을 확보하기 위하여 입출구를 통한 질량 유동률과 니들의 상승과 하강에 따른 제어체적의 변화율을 질량으로 환산하여 질량 보존법칙에 부합하는지 확인하였다[8]. 각 케이스에서 이론적 질량 변화량과 유동해석 결과와의 질량 변화량의 오차율은 1%이내로 나타났다.

노즐 출구를 기준으로 Urea-solution의 분사량을 계산한 결과 입출구 유량특성은 Fig. 4.와 같이 나타났으며, Fig. 4(a)는 입구의 질량유동률이며, Fig. 4(b)는 노즐 출구의 질량유동률이다. Fig. 4(a)에서 음의 값은 제어체적으로 유량이 들어오고 있음을 의미하고, 양의 값은 외부로 배출되고 있음을 의미한다. 초기 0.3ms까지 니들이 들리면서, 니들이 차지하고 있는 공간을 물이 채우기 때문에 많은 유량이 유입됨을 알 수 있고, 특히 열림속도가 빠른 NL-04의 경우가 가장 많은 유량유입을 보이고 있다. 하지만 니들이 하강하면서 닫히는 구간인 0.7 ~ 1.0ms 동안에는 NL-04의 경우가 가장 많은 유량이 제어체적을 빠져나가고 있다. 이는 니들의 하강속도가 가장 빠르기 때문이다. 이러한 이유로 Fig. 4(b)에서 보이는 바와 같이 0~ 0.7ms 동안 NL-02의 경우가 노즐로 분사되는 유량이 가장 많게 된다. 최종적으로 인젝터 노즐을 통하여 분사된 총 분사량, 즉 1회 분사량은 Fig. 5.와 같으며, NL-02 모델이 1.05 mg, NL-03 모델이 1.02 mg, 그리고 NL-04 모델에서 0.97 mg으로 니들이 움직이는 속도가 빨라질수록 유량이 감소하는 것을 경향을 보이고 있다.

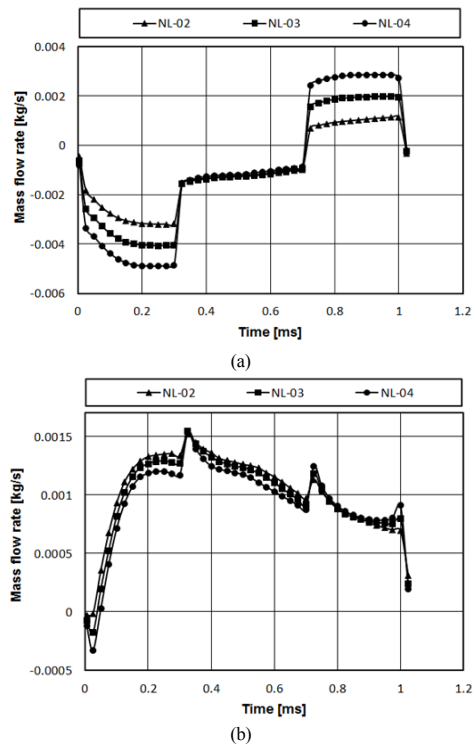


Fig. 4. Mass flow rate
(a) Inlet mass flow rate (b) Exit mass flow rate

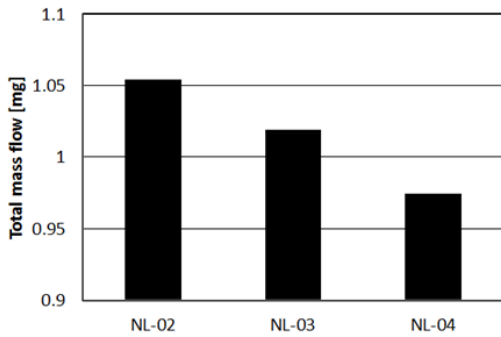


Fig. 5. Total injected mass flow rate

니들 속도에 따른 유량특성 분석하기 위하여 Fig. 6. 과 같이 니들 상승이 종료되는 0.3 ms를 기준으로 0.05 ms 전과 후의 속도벡터를 확인하였다. 니들이 상승할 때 니들 상승속도가 증가하면, 니들 하부의 빈 공간을 채우려는 유동이 증가하고, 이로 인하여 실제 노즐로 유입되는 유량은 감소하게 된다.

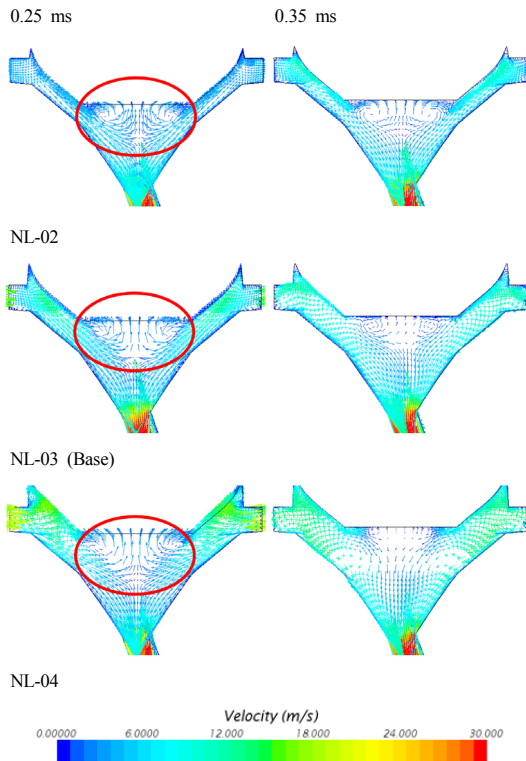


Fig. 6. Velocity vector under the needle

2.3.2 스월특성 분석

스월은 회전하는 유동에서 축방향 모멘텀과 각방향 모멘텀의 비로 정의되며, 본 연구에서는 인젝터의 스월 계수를 계산하기 위하여 식 (1) 과 같이 유동의 축방향 속도와 각방향 속도의 비를 이용하여 계산하였다. 식에서 $U_{\theta\alpha}$ 는 노즐을 중심축으로 한 각방향 속도를 의미하며, Q 는 출구방향 체적유량을 의미한다.

$$S = \frac{\int U_{\theta\alpha} dA}{Q} \quad (1)$$

스월특성을 계산하기 위한 구간은 Fig. 7.과 같이 노즐부를 일정한 간격으로 나누어 각 전단면별로 스월 계수를 계산하였다.

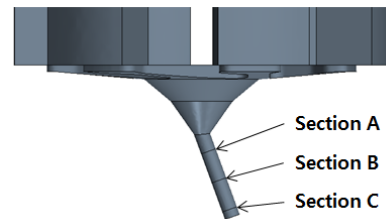


Fig. 7. Location for swirl calculation

베이스 모델인 NL-03의 스월계수 분석 결과는 Fig. 8.과 같다. Fig. 8(a)는 각 Section에서 시간에 따른 스월 계수 변화를 그래프에 도시한 결과이고, Fig. 8(b)는 스월 계수가 가장 큰 0.85 ms에서 각 전단면의 속도벡터이다. 니들의 상승, 유지, 하강 기간으로 나누어 평균 스월 계수를 계산하면, 상승 기간에서 0.009, 유지 기간에서 0.727, 하강 기간에서 1.462로, 상승 기간에서는 스월이 거의 발생하지 않고, 최대 니들리프트 유지기간에 스월이 발달하고, 하강기간에서 최대가 됨을 확인할 수 있다. 또한 노즐 출구에 가까워질수록 스월계수는 감소하는 것을 확인하였다. 이는 스월 디스크에서 생성된 스월유동이 노즐 벽면과의 마찰 등으로 인해 점진적으로 감소하기 때문으로 판단된다.

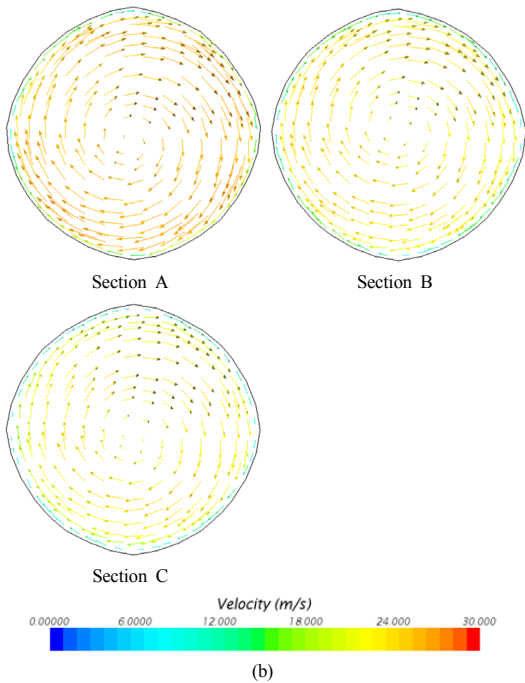
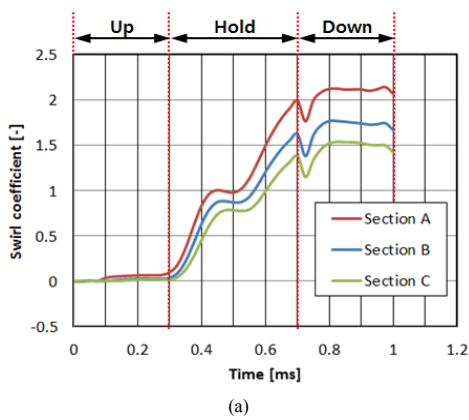


Fig. 8. Swirl coefficient
(a) NL-03 model,
(b) Velocity vector(NL-03 model, 0.85 ms)

출구와 가장 가까운 Section C에서 니들 리프트에 따른 스윙계수 분석결과는 Fig. 9와 같이 나타났다. 그래프 도시결과, 니들의 최대리프트 유지기간에는 리프트가 가장 높은 NL-04모델의 스윙계수가 크게 나타나며, 리프트가 낮은 NL-02가 가장 작았다. 그러나 니들이 하강하는 Down 기간에서는 특별한 경향성을 보이지 않았다.

노즐에서의 평균 스윙계수를 계산한 결과는 Fig. 10과 같으며, 0.87, 0.89, 0.94로 니들리프트가 높아짐에 따라 평균 스윙계수가 커짐을 확인할 수 있었다.

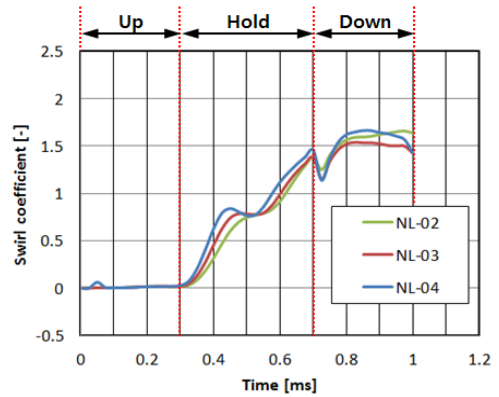


Fig. 9. Swirl coefficient (Section C)

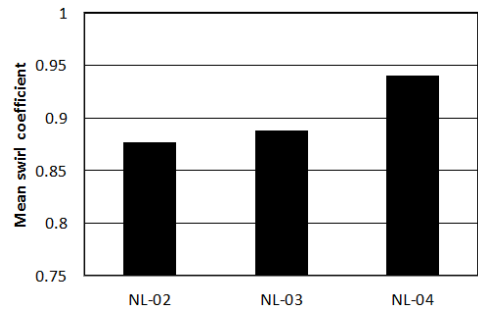


Fig. 10. Averaged swirl coefficient (Section C)

3. 결론

본 연구에서는 Urea SCR용 스윙 인젝터 내부유동의 전산 유동해석을 수행하였다. 니들의 최대 리프트 및 속도를 인젝터의 설계변수로 하여 Moving Grid 기법을 적용한 비정상 유동해석을 진행한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

- (1) 인젝터 내부의 유동특성을 분석한 결과, 니들의 속도가 증가할수록 출구를 통한 유량은 감소하는 것으로 나타났다. 이는 니들의 속도가 빨라질수록 니들하부의 공간을 채우려는 유량이 증가하고, 이러한 유량의 증가가 출구유량의 감소를 유발하게 된다.
- (2) 인젝터 노즐에서 스윙 특성을 분석한 결과, 출구에 가까워질수록 스윙은 감소하였다. 이는 노즐의 회전유동이 노즐 벽면과의 마찰로 인해 감소하기 때문으로 사료된다.
- (3) 최대 리프트 유지기간에서, 니들리프트가 높을수록

록 스월계수가 높게 나타났다. 또한 평균스월계수는 니들리프트가 높아질수록 커지는 경향을 보였다.

References

- [1] R. Snow, G. Cavatatio, D. Dobson, C. Montreuil and R. Hammerle, "Calibration of a LNT-SCR Diesel Aftertreatment System," SAE 2007-01-124, 2007.
DOI: <http://dx.doi.org/10.4271/2007-01-1244>
- [2] Y. Ham and Y. Park, "Development of Map based Open Loop Control Algorithm for Urea-SCR System," Transaction of KSAE, Vol.19, No.2, pp.95-105, 2011.
- [3] S. J. Jeong, W. S. Kim, J. K. Park, H. K. Lee and S. D. Oh, "The Development and Implementation of Model-based Control Algorithm of Urea-SCR Dosing System for Improving De-NOx Performance and Reducing NH3-slip," Transaction of KSAE, Vol.20, No.1, pp.50-56, 2012.
DOI: <http://dx.doi.org/10.7467/ksae.2012.20.1.095>
- [4] M. Colombo, I. Nova, E. Tronconi, V. SchmeiBer, B. Banbl-Konrad and L. Zimmermann, "NO/NO2/N2O-NH3 SCR Reactions over a Commercial Fe-Zeolite Catalyst for Diesel Exhaust Aftertreatment : Intrinsic Kinetics and Monolith Converter Modelling," Applied Catalysis b: Environmental, pp.106-118, 2012.
DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.apcatb.2011.09.023>
- [5] M. Koebel, M. Elesner and M. Kleemann, "Urea-SCR: A Promising Technique to Reduce NOx Emissions from Automotive Diesel Engines," Applied Catalysis, pp.335-345, 2000.
DOI: [http://dx.doi.org/10.1016/s0920-5861\(00\)00299-6](http://dx.doi.org/10.1016/s0920-5861(00)00299-6)
- [6] J. Oh, W. Cha, K. Kim, J. Lee and K. Lee, "A Study on the Characteristics and Droplet Uniformity of Spray Injection to Exhaust Gas Flow from Urea Solution Injector," Transaction of KSAE, Vol.19, No.3, pp.83-89, 2011.
- [7] J. W. Seo, K. I. Lee, J. T. Oh, Y. H. Choi and J. H. Lee, J. I. Park, "The Study on the Effects of Mixer Configurations on Fluid Mixing Characteristics in SCR System," Transaction of KSAE, Vol.16, No.6, pp.192-199, 2008.
- [8] S. I. Lee, S. Y. Park, "Numerical analysis of internal flow characteristics of urea injectors for SCR dosing system", Fuel, Vol.129, pp.54-56, 2014.
DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.fuel.2014.03.031>
- [9] CD-Adapco, "SATR-CCM+ ver. 8.06 User Guide", 2013.

곽 은 조(Eun-Jo Gwak)

[정회원]



- 2014년 2월 : 공주대학교 기계자동차공학부 (공학사)
- 2014년 3월 ~ 현재 : 공주대학교 기계공학과 석사과정

<관심분야>

열유체 해석, 내연기관 성능개발

박 성 영(Sung-Young Park)

[정회원]



- 1993년 2월 : 충남대학교 기계공학과 (공학사)
- 1995년 2월 : 충남대학교 기계공학과 (공학석사)
- 2002년 5월 : Texas A&M Univ. 기계공학과 (공학박사)
- 2006년 4월 ~ 현재 : 공주대학교 기계자동차공학부, 정교수

<관심분야>

열유체 해석, 내연기관 성능개발