

# 차량용 Regulator에서의 열유동 특성 해석 Analysis of Thermal and Flow Characteristics of Regulator for Vehicle

박경택<sup>1</sup>, 황윤건<sup>2</sup>, \*#박태조<sup>3</sup>, 강병루<sup>4</sup>

K. T. Park<sup>1</sup>, Y. G. Hwang<sup>2</sup>, \*#T. J. Park(tjpark@gnu.ac.kr)<sup>3</sup>, B. R. Kang<sup>4</sup>

<sup>1</sup>경상대학교 대학원, <sup>2</sup>경상대학교 기계항공공학부, <sup>3</sup>경상대학교 기계항공공학부, <sup>4</sup>(주)파카하니핀커넥터

Key words : CNG(Compressed Natural Gas), NGV(Natural Gas Vehicle), Regulator, Icing, CFD(Computational Fluid Dynamics), FLUENT

## 1. 서론

천연가스자동차(Natural gas vehicle : NGV)에서 연료시스템은 CNG(Compressed natural gas) 저장탱크, 레귤레이터(Regulator), 인젝터(Injector), 각종 밸브 및 필터 등으로 구성되어 있다. 저장탱크에는 연료1회 충전으로 충분한 운행거리를 확보하기 위하여 CNG를 20MPa 정도의 고압으로 충전한다. 충전된 CNG는 레귤레이터를 이용하여 저장탱크 압력에 관계없이 일정한 압력(보통 0.8MPa)으로 감압시킨 다음 인젝터를 통해 엔진으로 공급된다. 만일, 레귤레이터 출구에서의 가스 압력이 일정하지 않을 경우에는 엔진출력이 변동할 뿐만 아니라 심할 경우에는 시동이 되지 않거나 운전중에 정지할 수 있다. Fig.1은 현재 (주)파카하니핀커넥터에서 개발중인 NGV용 레귤레이터로 내부구조는 상부에 연료의 출구 압력을 일정하게 조절하기 위한 스프링, 다이어프램(Diaphragm), 제어밸브 및 밸브시트로 구성되어 있으며, 하부에는 연료에 동반된 이물질질을 제거하는 필터 및 고온의 엔진 냉각수를 통과시키는 용기가 설계되어 있다.

일반적으로 고압의 가스가 저압으로 감압될 때 대부분의 기체는 팽창되어 Joule-Thomson 효과에 의하여 온도가 급격히 강하한다. 이러한 온도 강하현상은 공급압력이 높을수록 크게 나타나며, CNG에 수분이 포함되어 있을 때는 응축이 되어 유동단면적을 감소시키게 되고 더욱더 강하게 결빙이 발생하게 된다. 만일, 이곳에서의 결빙은 레귤레이터의 성능뿐만 아니라 내구성에도 영향을 미치기 때문에 이에 대한 해결책으로 80°C전후의 엔진 냉각수가 레귤레이터 내부로 순환되도록 설계되어 있지만 이에 대한 연구는 전무한 실정이다. 따라서, 레귤레이터 내부의 열유동 특성을 정확하게 예측하여 실제에서 발생하는 제반문제를 효과적으로 해결하기 위해서는 CFD해석이 요구된다. 참고로, Gato & Henriques[1]은 파이프내를 유동하는 CNG의 유동특성을 해석하였다. Shin et al.[2-3]은 입출구 압력비, 개도비 등에 따른 레귤레이터내의 유동특성을 조사하였지만 해석조건이 실제의 압력조건과는 큰 차이를 보였다. Yeo et al.[4-5]은 CFD 해석을 사용하여 CNG 충전용 체크밸브와 Receptacle 내의 유동특성을 상세히 해석하여 내부부품의 파손과 결빙발생 원인을 규명하였다.

본 논문에서는 열-유체해석 프로그램인 FLUENT[6]를 사용하여 NGV용 레귤레이터 내부에 엔진 냉각수를 공급하지 않는 경우에 대한 열유동 특성을 상세하게 조사하여 고성능의 제품설계에 사용될 수 있는 설계자료를 확보하고자 한다.

## 2. 수치해석 및 방법

내부유로가 복잡한 레귤레이터를 통과하는 CNG의 유동특성을 고찰하기 위하여 이상기체에 대한 3차원 압축성 정상상태 난류유동으로 해석하고자 한다. 이때, 난류모델로는 표준 k-ε 모델을 사용하고 표준벽함수(Standard wall function)를 적용하였다. Fig.2는 실제모델을 바탕으로 부속프로그램인 ICEM CFD를 이용하여 구성된 격자계를 나타낸 것으로서 입구부에서 출구부까지 CNG가 유동하는 유로를 모델링하였지만 다이어프램 챔버는 수치해석에 포함시키지 않았다. 전체 격자수는 대략 50만개 정도이며, 압력강하가 크게 발생하고 유속이 급격하게 증가하는 밸브 시트 부근에는 격자의 간격을 조밀하게 하였다.

Table 1에는 CNG에 대한 주요물성치를 나타내었다.



Fig. 1. CNG regulator for NGV.

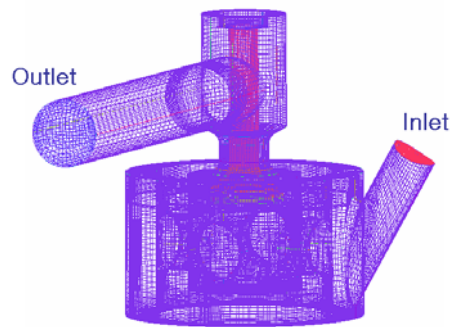


Fig. 2. Grid system used in numerical analysis.

Table 1. Properties of CNG.

$\rho$ kg/m <sup>3</sup>	$c_p$ , J/kg-K	Viscosity, kg/m-s
$7.90 \times 10^{-3}$	2,222	$1.087 \times 10^{-5}$

## 3. 결과 및 고찰

본 논문에서는 레귤레이터의 입구압력을 실제 NGV 저장탱크의 압력과 동일하게 20MPa ~ 1MPa 범위에서 설정하였고, 출구압력은 0.8MPa로 고정하여 해석하였다. 가스에 대한 온도조건은 입구에서는 300K로 가정하였으며, 모든 벽에는 단열조건을 적용하였다. 밸브의 열림 정도와 입구압력을 변화시키면서 CNG의 열유동 특성인 속도, 압력, 온도 분포 및 질량유량의 변화를 조사하였다.

Fig.3~Fig.5에는 밸브의 열림율이 25% 상태에서 입구압력이 1MPa와 10MPa로 크게 차이가 있는 경우에 대한 정압(Static pressure), 속도벡터 및 온도 분포를 비교하여 순서대로 나타낸 그림이다. 레귤레이터내에서 발생하는 최저압력은 입구압력이 1MPa인 경우에는 밸브 시트와 밸브 간극 끝 부분에서 발생하지만 10MPa인 경우에는 보다 출구측으로 이동하고 있다. 입구압력이 고압일수록 밸브와 밸브시트부 사이 간극에서의 압력강하는 크게 되고 이는 CNG를 크게 팽창시켜서 결과적으로 유속이 급격하게 증가한다. 또한, 이러한 팽창에 따른 CNG의 압력강하는 Joule-Thomson 효과라고 부르는 냉각현상을 유발시켜 CNG의 온도는 급격하게 낮아지고 있다[5].

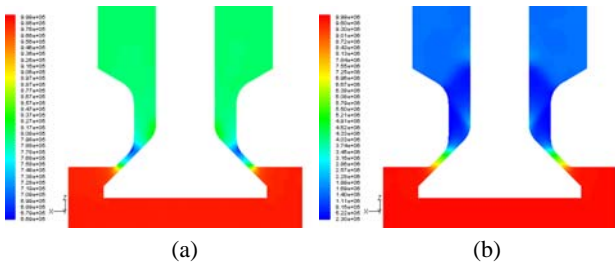


Fig. 3. Static pressure distribution. (a) 1MPa, (b) 10MPa

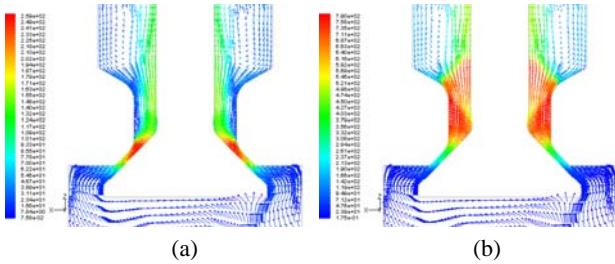


Fig. 4. Velocity vector distribution. (a) 1MPa, (b) 10MPa

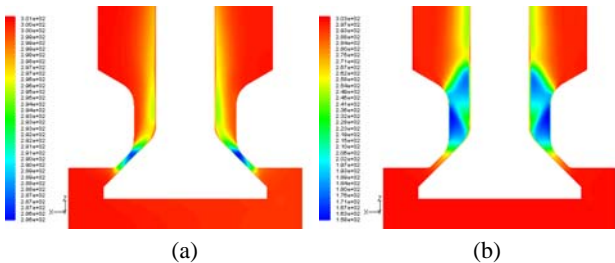


Fig. 5. Temperature distribution. (a) 1MPa, (b) 10MPa

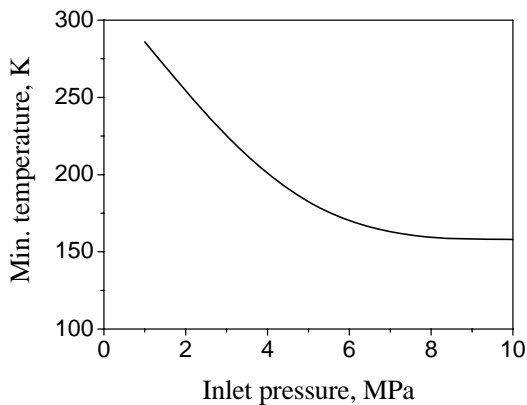


Fig. 6. Variation of minimum temperature with inlet pressure.

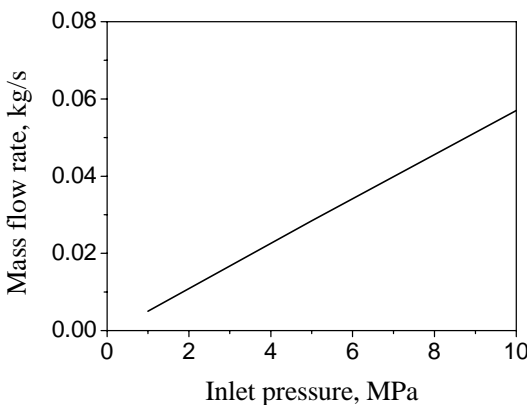


Fig. 7. Variation of mass flow rate with inlet pressure.

Fig.6과 Fig.7은 밸브가 25% 정도 열린 경우, 입구압력의 변화에 따른 레귤레이터내에서의 최소온도와 출구에서의 질량유량의 변화를 각각 나타낸 결과이다. 입구압력(저장탱크 압력)이 고압일수록 레귤레이터내에서의 최소온도는 크게 낮아지고 있으므로 많은 문제를 발생할 것으로 예상된다. 즉, CNG에 약간의 수분이라도 포함되어 있다면 이것이 밸브부에 응축되어 유동단면적을 감소시키게 되고 이로 인하여 더욱 강하게 결빙이 초래하게 되어 레귤레이터의 성능뿐만 아니라 내구성에도 큰 영향을 미칠 수 있다. 또한, 온도강하는 입구압력이 저압일 경우에는 아주 민감하지만 고압일수록 상대적인 변화는 크게 감소하고 있다. 한편, 밸브의 열림율이 일정한 경우에 레귤레이터를 통하는 CNG의 질량유량은 입구압력에 따라서 직선적으로 변화하였다.

#### 4. 결론

본 논문에서는 현재 국내에서 사용중인 NGV용 레귤레이터에서 발생하는 제반문제점을 해결한 고성능 제품의 설계를 위한 기초자료를 확보하기 위하여 열-유체해석 상용 프로그램인 FLUENT를 사용하여 입구압력의 변화에 따른 레귤레이터 내의 열유동 특성을 상세하게 조사하였다. 이 결과, 입구압력이 고압일수록 고속유동과 함께 Joule-Thomson 효과에 의한 밸브 시트부 부근에서 온도가 급격하게 저하되어 결빙이 발생할 가능성이 크게 증가하였다. 이에 대한 해결책으로 기존의 제품에서 채용하고 있는 고온의 엔진 냉각수를 레귤레이터 내부로 순환시키는 경우에 대한 상세한 추가해석이 요구된다. 한편, 온도강하는 저압일 경우에는 아주 민감하지만 고압으로 될수록 이의 변화는 상대적으로 크게 감소하였다. 질량유량은 밸브의 열림율이 일정한 경우에 입구압력에 따라서 직선적으로 변화하였다. 따라서, 본 논문에서 사용한 CFD해석 방법과 결과는 NGV용 레귤레이터의 설계와 성능향상에 유용하게 사용될 수 있을 것으로 기대된다.

#### 후기

이 논문은 (주)파카하니핀커벡터와 2007년도 지방대학혁신역량강화사업에 의해 지원되었음.

#### 참고문헌

- Gato, L. M. C. and Herniques, J. C. C., "Dynamic Behaviour of High-pressure Natural-gas Flow in Pipelines," *Int. J. of Heat and Fluid Flow*, Vol.26, pp.817~825, 2005.
- Shin, C.H., Ha, J. M., Lee, C. G., Her, J. Y., Im, J. H. and Joo, W. G., "A Study about Critical Flow Characteristics and Pipeline Network Modeling of a Pressure Regulator(I)," *Trans. of the KSME*, pp.1291~1298, 2005.
- Shin, C.H., Ha, J. M., Lee, C. G., Her, J. Y., Im, J. H. and Joo, W. G., "A Study about Critical Flow Characteristics and Pipeline Network Modeling of a Pressure Regulator(II)," *Trans. of the KSME*, pp.1299~1306, 2005.
- Yeo, K. M., Park, T. J., Chung, H. T., Song, M. G. and Kang, B. R., "Analysis of Check Valve for CNG Vehicle Fuel Supply Line," *Trans. of the KSME*, pp.159~163, 2006.
- Yeo, K. M., Park, K. T., Park, T. J., Chung, H. T. and Kang, B. R., "Icing Analysis of Fuel Supply Line Components for CNG Vehicle," *Trans. of the KSME*, pp.197~202, 2006.
- FLUENT, FLUENT 6.0 Manual, 2002.