

수소 차량용 Check Valve내의 CFD 해석

CFD Analysis of Check Valve for Hydrogen Vehicle

*황윤건¹, #박태조², 송명길³, 강병루³

*Y. G. Hwang¹, #T. J. Park(tjpark@gnu.ac.kr)², M. G. Song³, B. R. Kang³
¹경상대학교 대학원, ²경상대학교 기계항공공학부, ³(주)파카하니핀켄벡터

Key words : Hydrogen, Check Valve, Joule-Thomson effect, Refueling, CFD, FLUENT

1. 서론

급속한 산업 발전에 따라 화석연료의 사용이 크게 증가하고 있다. 특히 향후에 급속한 경제성장이 예상되는 개발도상국들의 에너지 수요는 세계의 석유수급 동향에 아주 큰 영향을 줄 것으로 예상된다. 이에 따라 화석연료의 사용으로 야기된 대기오염, 기후변화, 에너지위기 등과 같은 제반문제의 완화와 해결을 위해서 수소연의 사용이 불가피하다. 현재 수소의 저장/수송에 관련된 기술은 전기를 발생시키는 연료전지 스택기술과 더불어 연료전지 자동차의 일충전 주행거리 확보에 필요한 핵심기술 중의 하나로 인식되고 있다. 이에 국내에서는 35MPa급 저장용기를 2001년도에 개발한 이후에 대부분 이를 채택하고 있다. 한편, Quantum사에서는 최근에 Carbon-fiber-reinforced plastic(CFRP)를 사용한 70MPa급 고압저장용기를 개발하였으며, GM사에서는 고압저장용기를 장착한 자동차를 개발하였다. 이와 같이 연료전지 자동차의 일충전 주행거리를 확보하기 위해서는 저장용기의 고압화가 필수적이므로 수소 충전시스템의 운전압력 또한 고압이어야 한다. 하지만 고압의 사용조건은 수소충전 시스템에 여러 가지의 문제를 야기할 수 있다. 즉, 고압의 기체가 밸브류 등을 통과하는 경우에 하류에서는 초음속유동의 발생과 이로 인한 충격파가 소음/진동의 주원인으로 작용하는 경우가 매우 빈번하다[1].

지금까지 연료전지기술의 이전단계인 CNG용 충전 시스템이나 부품에 대해서는 소수의 연구가 수행되었지만[3-4] 수소충전용 시스템이나 관련부품에 대한 연구결과는 극소수에 불과한 실정이다. Gato 등[5]은 파이프 내에서의 CNG 유동에 대한 수치해석을 수행하였으며, Shipley[6]는 수소를 충전하는 경우에 체크밸브 전·후에서의 압력 및 온도 등의 변화를 측정하였다.

본 논문에서는 연료전지 자동차의 고압수소충전라인에 사용될 수 있는 최적의 체크밸브를 개발하기 위한 연구의 일환으로 열-유체해석 상용 프로그램인 FLUENT를 사용하여 이상기체와 실제기체에 대한 열유동특성을 상세하게 조사하고자 한다.

2. 수치해석 및 방법

2.1 지배방정식

내부유로가 복잡한 체크밸브를 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.

Reynolds-Average 기법을 적용한 연속방정식과 운동량방정식은 각각 다음의 식(1), 식(2)와 같다.

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho u_i) = 0 \quad (1)$$

$$\frac{\partial \rho}{\partial t}(\rho u_i) + \frac{\partial}{\partial x_j}(\rho u_i u_j) = -\frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\mu \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) - \mu \left(\delta_{ij} \frac{2}{3} \frac{\partial u_k}{\partial x_k} \right) \right] + \frac{\partial}{\partial x_j}(-\overline{\rho u_i u_j}) \quad (2)$$

여기서, (2)식을 Reynolds-Averaged Navier-Stokes (RANS) 방정식이라 부르며, 우변의 마지막항인 Reynolds Stress는 난류모델로 Standard k-ε 모델을 사용하는 경우에 다음과 같이 표현된다.

$$-\overline{\rho u_i u_j} = \mu_t \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) - \frac{2}{3} \left(\rho k + \mu_t \frac{\partial u_k}{\partial x_k} \right) \delta_{ij} \quad (3)$$

여기서, u_t 는 난류점성계수, k 는 난류운동에너지, ϵ 은 난류소산율이다.

한편, 에너지 방정식은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho E) + \frac{\partial}{\partial x_i} [u_i(\rho E + p)] = \frac{\partial}{\partial x_j} \left(k_{eff} \frac{\partial T}{\partial x_j} + u_i(\tau_{ij})_{eff} \right) + S_h \quad (4)$$

여기서, E 는 total energy, k_{eff} 는 유효열전도율, $(\tau_{ij})_{eff}$ 는 deviatoric stress tensor, S_h 는 energy source항이다.

2.2 수치해석 모델

본 논문에서 해석대상으로 하는 수소충전용 체크밸브는 Parker Instrumentation사(미국) 제품으로 호칭규격은 1/2"이다.

Fig.2에는 해석에 사용한 체크밸브의 단면을 나타낸 그림으로 포핏(Poppet)에는 6개의 구멍이 있다. Fig.3은 전처리 프로그램인 Gambit을 이용하여 구성된 수치해석에 사용된 격자계를 나타낸 그림으로 원주방향에 대한 유동의 대칭성을 이용하여 유동단면에 대하여 1/6만 모델링하였으며 이때, 유동영역 격자의 개수는 38,000개, 고체영역의 격자 개수는 20,000개 정도이다.

본 논문에서는 수소충전용 체크밸브 내에서의 열유동특성의 변화를 조사하기 위하여 입구압력이 70MPa 출구압력이 65MPa인 경우로 해석하였다. 이때, 주입되는 수소가스와 외기의 온도는 26.6°C로 일정하게 두었고 사용한 수소의 물성은 이상기체와 실제기체로 각각 나누어 해석하였다.

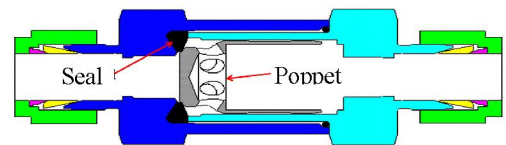


Fig.1 Sectional view of check valve

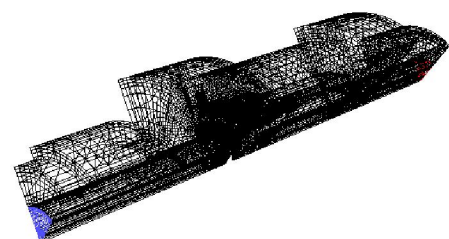


Fig. 2 Grid generation of check valve

3. 결과 및 고찰

Fig.3은 정압(Static pressure)분포를 나타낸 결과로서 수소충전 시 체크밸브를 통과하는 고압의 수소가스는 내부의 포핏 잔후부에서 대부분의 압력강하가 발생함을 알 수 있다. 이에 따라 수소가스가 출구측으로 유동할수록 더욱 팽창하여 체적이 증가하므로 Fig.4의 결과와 같이 유동속도 증가하게 된다. 특히, Fig.6에서 최저온도는 유로의 단면적이 급격하게 작아지고 유동방향이 변화하는 포핏의 구멍부를 통과한 후에 발생한다.

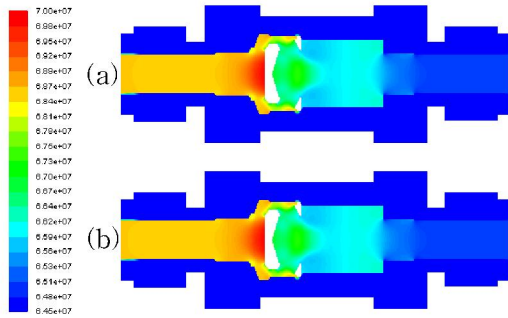


Fig. 3 Static pressure distribution. (a) Ideal gas, (b) Real gas

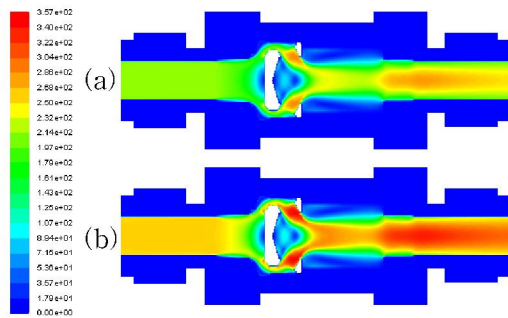


Fig. 4 Velocity distribution. (a) Ideal gas, (b) Real gas

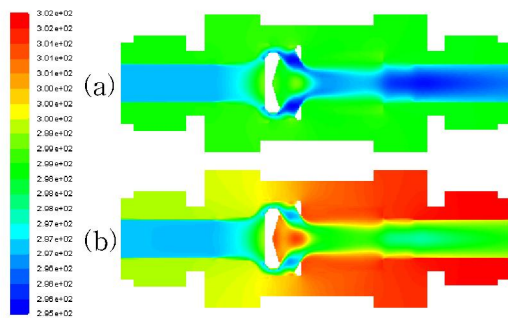


Fig. 5 Temperature distribution. (a) Ideal gas, (b) Real gas

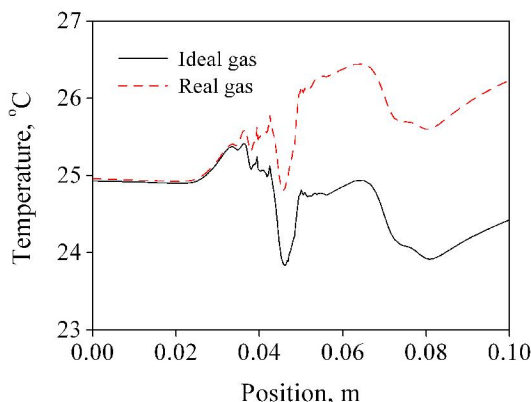


Fig. 6 Temperature distribution along to check valve center.

Fig.6은 체크밸브 내에서 유동하는 수소가스의 온도를 중심선에 따라 나타낸 그래프이다. Fig.4에서 작동유체의 상태에 따라 유동속도는 유체의 상태가 이상기체와 실제기체일 때 각각 298m/s, 352m/s로 실제기체일 때 54m/s정도 증가함을 보였다. 유체의 온도는 이상기체일 때 입출구 온도차가 0.4°C로 강하하였지만 실제기체일 경우 이상기체보다 속도가 증가함에도 불구하고 1.4°C 증가하였다. 이는 고압의 수소가 Throttling 과정 후 온도가 상승하는 역 줄뜸슨 효과가 실제기체 상태방정식으로부터 고려되었기 때문이다. 실제로 수소가 Throttling 과정을 진행할 때 역전온도 -68°C이하, 역전압력 160bar이하 에서는 냉각하지만 이외의 조건에서는 항상 발열하는 특성을 보인다. 즉 상온에서 역전압력 이상의 압력으로 해석한 본 논문의 경계조건에서는 수소가 팽창함에 따라 발열되는 역 줄뜸슨 효과를 보이게 된다. 실제의 기체를 구성하는 분자는 이상기체에서 가정한 것과는 달리 분자가 서로 상호작용을 하고 있으며, 또한 분자의 크기도 무시할 수 없다. 따라서 이들이 무수히 많이 모여 나타내는 열역학적인 성질도 이상기체에서 벗어난 행동을 하게 된다. 특히 압력이 높아짐에 따라 기체의 밀도가 커져 분자간의 간격이 줄어들거나 계의 온도가 낮아지는 경우에는 이상기체의 상태와는 크게 다른 현상을 나타내므로 수소충전라인용 부품을 해석하기 위해서는 분자의 상호작용을 고려한 실제기체에 관한 해석이 필요하다.

4. 결론

본 논문에서는 수소자동차에서 고압의 수소충전에 사용되는 최적의 체크밸브를 설계하기 위한 연구의 일환으로 열·유체해석 상용 프로그램인 FLUENT를 사용하여 체크밸브 입·출구부에서의 충전압력에 따른 열유동특성을 상세하게 조사하였다. 이 결과, 수소충전용 체크밸브에서는 작동유체의 상태에 따라 체크밸브 내에서의 열유동특성에 아주 큰 영향을 미쳤다. 특히, 실제기체일 경우 줄뜸슨 효과가 고려되어 이상기체와 크게 다른 온도특성을 보였다. 따라서, 본 논문에서 사용한 해석 방법과 결과는 수소충전 시스템을 구성하는 제반부품의 설계와 성능예측에 크게 기여할 수 있을 것으로 기대된다.

후기

이 논문은 2단계 BK21사업과 (주)파카하니핀커넥터의 지원으로 수행되었음을 밝힙니다.

참고문헌

1. Woo, S. H. and Kim, T. H., 1999, "Further Consideration on Internal Gas Flow Chock," Trans. of KSME, Vol. B, pp.379~384.
2. Next Energy, 2007, "Fueling Specification for 70MPa Compressed Hydrogen Vehicles", pp.1~26.
3. Yeo, K. M., Park, T. J., Chung, H. T., Song, M. G. and Kang, B. R., 2006, "Analysis of Check Valve for CNG Vehicle Fuel Supply Line," Trans. of the KSME, pp.159~163.
4. Yoo, J. C., Yeo, K. M., Park, T. J. and Kang, B. R., 2006, "Analysis of Check Valve Seal for CNG Vehicle Fuel Supply Line," J. of the KSTLE, Vol.22, pp.329~334.
5. Gato, L. M. C. and Hemiques, J. C. C., 2005, "Dynamic Behaviour of High-pressure Natural-gas Flow in Pipelines," Int. J. of Heat and Fluid Flow, Vol.26, pp.817~825.
6. Shipley, E., 2002, "Study of Natural Gas Vehicles (NGV) During the Fast Fill Process," MS Thesis, West Virginia Univ.
7. Hwang, K. S. and Ko, D. K., 2003, "Dust Cleaning Technology of Reform Tub Zone at Wire Rod Mill Plant," Trans. of RIST, pp.359~368.