

수소자동차의 연료주입라인용 Check Valve 내의 유동해석

박 경택¹⁾, 여 경모²⁾, 박 태조³⁾, 강 병루⁴⁾

Flow Analysis of Check Valve for Hydrogen Vehicle Refueling Line

Kyongtaek Park, Kyeongmo Yeo, Taejo Park, Byeongroo Kang

Key words : Hydrogen(수소), Check Valve(체크밸브), CFD(전산유체역학), Choking(초우킹), FLUENT

Abstract : The high pressure hydrogen gas refueling system is required for fuel cell vehicle. In this paper, a commercial computational fluid dynamics (CFD) code, FLUENT is adopted to investigate the gas flow characteristics inside the check valve for various refueling and tank pressures. The results showed that the choking phenomena can occur for certain refueling pressures, therefore refueling processes should be divided by multiple stages. And a design method to prevent the seal departure problem which reported in CNG usages is required.

1. 서론

산업혁명이후로부터 지금까지의 급속한 산업 발전에 따라서 화석연료의 사용이 매년 증가하고 있다. 특히, 향후에 급속한 경제성장이 예상되는 개발도상국들의 에너지 수요는 세계의 석유수급 동향에 아주 큰 영향을 줄 것으로 예상되고 있다. 이와 같이 화석연료의 사용으로 야기된 대기오염, 기후변화, 에너지위기 등과 같은 제반문제의 완화와 해결을 위해서는 신/재생에너지의 사용을 피할 수 없게 되었다. 이에 따라 세계의 주요 자동차회사에서는 도시지역의 대기오염과 국가의 전체 에너지 소비량에 큰 영향을 주고 있는 자동차에 수소를 연료로 사용하는 연료전지 자동차(Fuel cell vehicle)의 개발에 집중하고 있다.

Fig.1은 연료전지 자동차의 동력발생계통을 개략적으로 나타낸 그림으로 내연기관 자동차의 동력변환장치에 해당하는 엔진을 연료전지로 대체하고, 연료전지에서 생산된 전기로 모터를 구동시켜 주행한다. 연료전지는 수소와 산소의 전기화학 반응으로 전기를 직접 얻기 때문에 내연기관 자동차와 비교하여 유해물질은 물론 지구온난화의 주범인 이산화탄소를 전혀 배출하지 않는다. 또한, 기존의 내연기관이 갖는 열역학적인 제한이 수반되지 않기 때문에 자동차의 평균운전영역에서 내연기관 자동차 보다 효율이 2~3배 높은 것으로 알려져 있다.

한편, 현재의 연료전지 자동차에서 수소저장 기술은 전기를 발생시키는 연료전지 스택기술과 더불어 연료전지 자동차의 일충전 주행거리 확보에 필요한 중요한 기술중의 하나로 인식되고 있다. 이에 국내에서는 2001년도에 350bar급 저장용

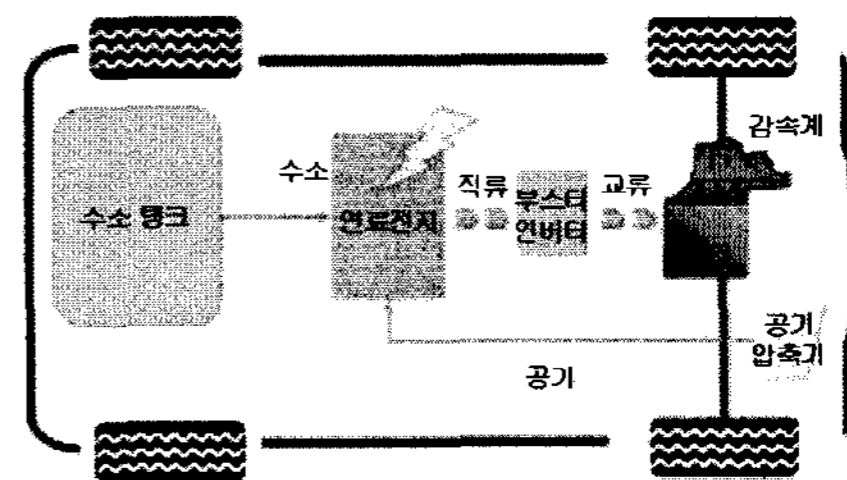


Fig.1 Schematic of power generation system in FCV

기를 최초로 적용한 이후에 대부분 이를 채택하고 있으며, 최근에는 GM에서 700bar급 고압저장용기를 장착한 자동차를 개발하였다. 이와 같이 일충전 주행거리의 확보를 위해서는 저장용기의 고압화가 필수적이므로 Fig.2에 나타낸 것과 같은 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

- 1) 경상대학교 기계항공공학부
E-mail : pkt-707@nate.com
Tel : (055)751-5315 Fax : (055)757-5622
- 2) 경상대학교 기계항공공학부
E-mail : revolutiontazo@lycos.co.kr
Tel : (055)751-5315 Fax : (055)757-5622
- 3) 경상대학교 기계항공공학부
E-mail : tjpark@gnu.ac.kr
Tel : (055)751-5315 Fax : (055)757-5622
- 4) (주)파카하너핀커넥터
E-mail : brkang@parker.com
Tel : (055)371-3300 Fax : (055)389-0115

초음속유동의 발생과 이로 인한 충격파가 소음/진동의 주원인으로 작용하는 경우가 매우 빈번하다⁽¹⁾. 또한 초음속의 내부유동은 초우킹(Choking) 현상을 수반하므로 이로 인하여 시스템이나 구성부품이 파손될 뿐만 아니라 충전시간도 장기화될 수 있다. 특히, 이러한 문제들은 현장에서 단순하게 해결할 수 없기 때문에 정확한 유동해석과 이에 근거한 제어대책 및 부품설계가 요구되고 있다. 참고로 현재 개발중인 수소연료충전 시스템에서는 Fig.3과 같이 충전과정을 단계적으로 나누어 충전하는 Process를 적용하여 초우킹 등과 같은 문제발생을 피하고 있다⁽²⁾.

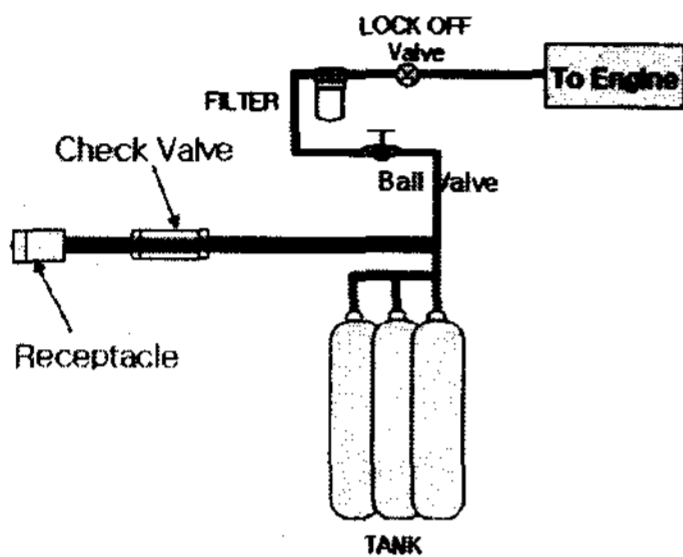


Fig. 2 Schematic of FCV fuel supply line

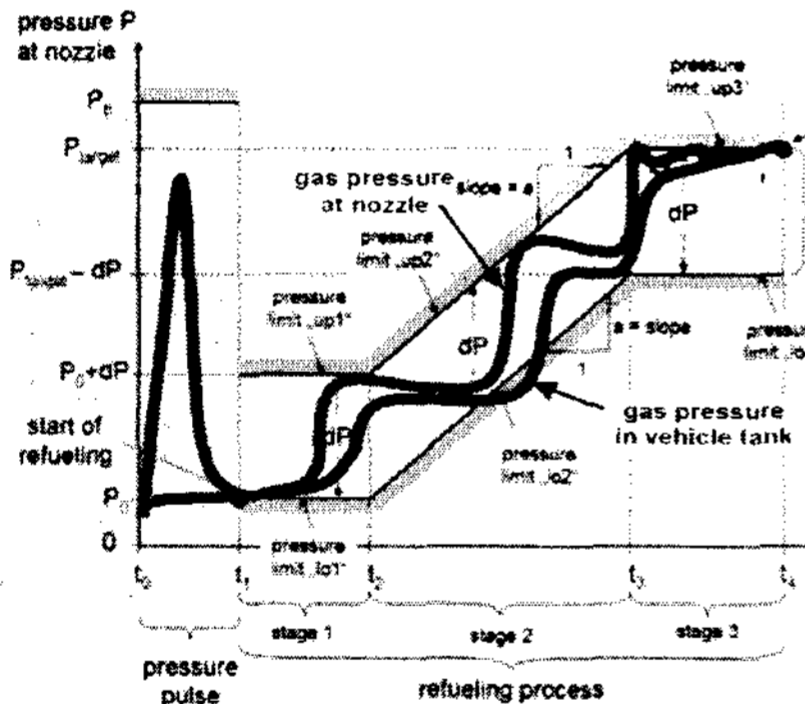


Fig. 3 Example of hydrogen refueling process

지금까지 연료전지기술의 이전단계인 CNG (Compressed natural gas)용 충전 시스템이나 부품에 대해서는 소수의 연구가 수행되었지만 수소충전용 시스템이나 관련부품에 대한 연구결과는 전무한 실정이다. Gato 등⁽³⁾은 파이프 내에서의 CNG 유동에 대한 수치해석을 수행하였으며, 여경모 등⁽⁴⁾이 FLUENT를 사용하여 CNG충전용 체크밸브에 대한 정상상태 CFD해석결과를 구하였다. 한편, 유재찬 등⁽⁵⁾은 참고문헌(4)의 결과를 사용하여 간섭량과 충전압력에 의한 시일의 변형거동 해석결과로부터 시일의 이탈원인을 규명하였다.

본 논문에서는 연료전지 자동차의 고압수소충전라인용 체크밸브(Check valve)에서 발생할 수 있는 문제들의 원인규명과 충전과정에 대한 근거를 제시하기 위하여 열·유체해석 상용 프로그램인 FLUENT를 사용하여 유동특성을 상세하게 조사하고자 한다.

2. 수치해석 모델 및 방법

2.1 지배방정식

본 논문에서는 내부유로가 복잡한 3차원의 형상인 체크밸브 내에서의 유동특성을 조사하기 위하여 3차원의 압축성 정상상태 난류유동으로 해석하였다. 이때, 난류모델로는 표준 k-ε 모델을 사용하고 표준벽함수(Standard wall function)를 적용하였다. Reynolds-Average 기법을 적용한 질량보존 방정식, 운동량 방정식 및 에너지 방정식은 순서대로 다음 식들과 같다.

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

$$\begin{aligned} \frac{\partial \rho}{\partial t} (\rho u_i) + \frac{\partial}{\partial x_j} (\rho u_i u_j) = & - \frac{\partial p}{\partial x_i} \\ & + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\mu \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) - \left(\frac{2}{3} \mu \frac{\partial u_l}{\partial x_l} \delta_{ij} \right) \right] \\ & + \frac{\partial}{\partial x_j} (-\rho \overline{u_i u_j}) \end{aligned} \quad (2)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial t} (\rho E) + \frac{\partial}{\partial x_i} [u_i (\rho E + p)] \\ = \left(k_{eff} \frac{\partial T}{\partial x_j} + u_i (\tau_{ij})_{eff} \right) + S_h \end{aligned} \quad (3)$$

여기서, 위의 식(2)는 Reynolds-Averaged Navier-Stokes (RANS) 방정식⁽⁶⁾이라 부른다.

2.2 수치해석 모델

본 논문에서 해석대상으로 하는 수소 충전용 체크밸브는 Parker Instrumentation사(미국) 제품으로 호칭규격은 1/2"이며 이들의 상세한 형상은 참고문헌⁽⁴⁾에 나타내어져 있다.

Fig.4에는 해석에 사용한 체크밸브의 단면을 나타낸 그림으로 포핏(Poppet)에는 6개의 구멍이 있다. Fig.5는 전처리 프로그램인 Gambit을 이용하여 구성한 수치해석에 사용된 격자계를 나타낸 그림으로 원주방향에 대한 유동의 대칭성을 이용하여 유동단면에 대하여 1/6만을 모델링하였다. 이때, 격자의 수는 25만개 정도이다.

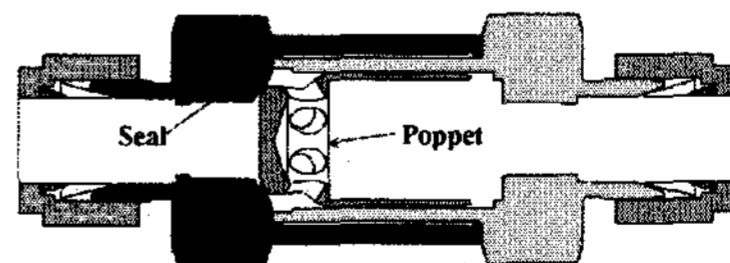


Fig. 4 Sectional view of check valve

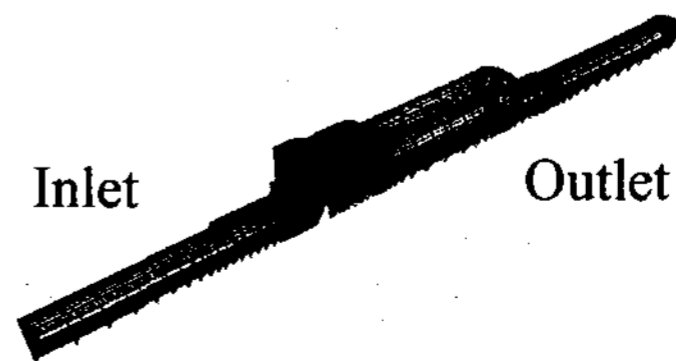


Fig. 5 Grid generation of check valve

본 논문에서는 충전압력의 차이에 따른 수소 충전용 체크밸브 내에서의 유동특성의 변화를 조사하기 위하여 사용한 유체는 수소이며, 주요물성치는 Table.1에 나타내었다. 입구압력이 70bar인 저압의 경우와 700bar인 고압의 경우로 나누어 해석하였다. 이때, 출구압력은 입구압력이 저압인 경우에는 60bar에서 25bar까지, 고압인 경우에는 600bar에서 250bar 까지 각각 변화시켰다.

Table. 1 Properties of Hydrogen

ρ , kg/m ³	C_p , J/kg·K	Viscosity, kg/m·s
8.189×10^{-2}	14,283	8.411×10^{-6}

3. 결과 및 고찰

Fig.6~Fig.8에는 체크밸브의 입구압력을 70bar로 고정한 상태에서 출구압력이 65bar와 60bar로 서로 다른 경우에 대한 정압(Static pressure), 속도 및 마하수의 분포를 서로 비교하여 나타내었다. 정압분포를 나타낸 Fig.6의 결과로부터 충전시 체크밸브를 통과하는 고압의 수소가스는 포핏의 전·후부에서 대부분의 압력강하가 발생함을 알 수 있다. 이에 따라 수소가스가 출구측으로 유동할수록 더욱 팽창하여 체적이 증가하므로 Fig.7의 결과와 같이 유속도 증가하게 된다. 특히, 최고속도는 유로의 단면적이 급격하게 작아지고 유동방향이 변화하는 포핏의 구멍부를 통과한 후에 발생한다. 또한, 입·출구간의 차압이 클수록 압력강하도 크게 될 뿐만 아니라 유동속도도 크게 증가하고 있다. 참고로, 입·출구간의 차압의 차이가 5bar 정도로 작음에도 불구하고 최대속도는 200m/s 정도의 아주 큰 차이를 나타내고 있으며, 이러한 경향은 마하수의 분포를 비교한 Fig.8의 결과에서 더욱 잘 이해할 수 있다.

Fig.9와 Fig.10에는 입구압력이 700bar으로 고압이고, 입·출구간의 차압도 100bar로 아주 큰 경우의 속도분포와 마하수의 분포를 각각 나타내었다. 그러나 Fig.7과 Fig.8에 비하여 차압의 크기가 10배정도 큼에도 불구하고 속도와 마하수의 크기 및 분포는 Fig.7(b) 및 Fig.8(b)와 아주 유사하게 나타났다. 이러한 결과로부터 체크밸브를 통과하는 수소가스의 유동특성을 정확하게 예측하기 위해서는 입구부 압력과 함께 입·출구간 차압의 크기를 동시에 고려해야함을 알 수 있다. 즉, 수소자동차에서 수소저장 탱크가 비어있을 경우와 상당히 충전되어 있는 경우의 충전특성이 크게 다르기 때문에 이를 고려한 충전작업을 수행해야함을 의미한다.

Fig.11과 Fig.12는 입구압력이 저압(70bar)과 고압(700bar)인 경우에 입·출구간 차압의 크기에 따른 충전되는 질량유량의 변화를 각각 나타낸 결과로 차압의 크기 차이가 10배로 아주 큼에도 불구하고 결과는 거의 유사한 경향을 나타내고 있다. 특히, 저압과 고압인 경우의 차압이 각각 45bar와 450bar 정도로 되면 마하수가 1이상인 초음속유동이 국부적으로 발생하고 이로 인하여 질량유량이 더 이상 증가하지 않는 초우킹 현상이

발생하였다. 따라서, 차량에 설치된 저장탱크에 700bar의 고압으로 수소를 충전하기 위해서는 Fig.3에 나타낸 것과 같이 단계적으로 충전해야만 충전시간을 단축할 수 있을 뿐만 아니라 초음속 유동 시에 발생하는 충격파에 의한 손상으로부터 충전시스템을 보호할 수 있다.

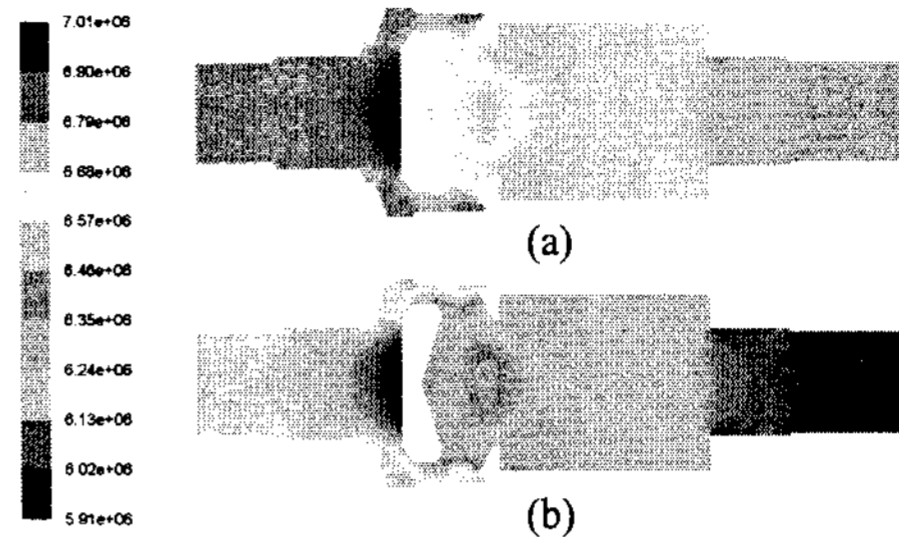


Fig. 6 Static pressure distribution, inlet : 70bar, outlet : (a) 65bar, (b) 60bar

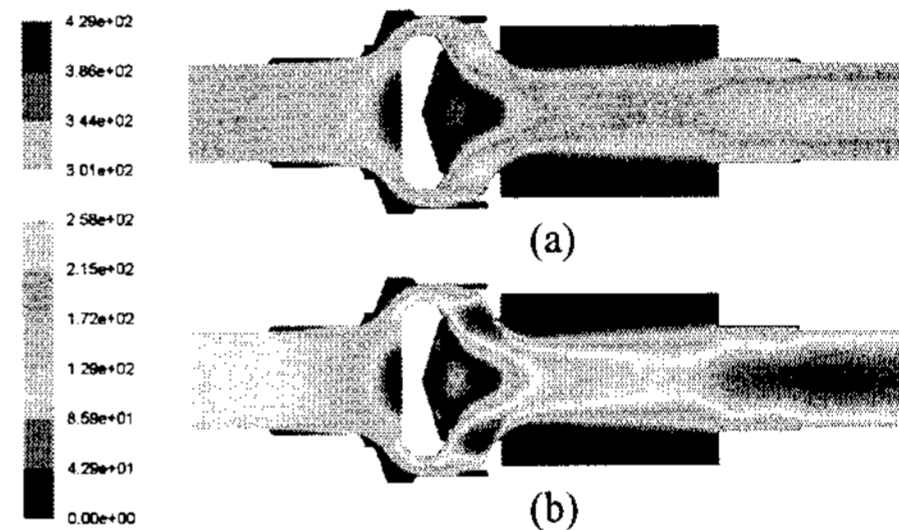


Fig. 7 Velocity distribution, inlet : 70bar, outlet : (a) 65bar, (b) 60bar

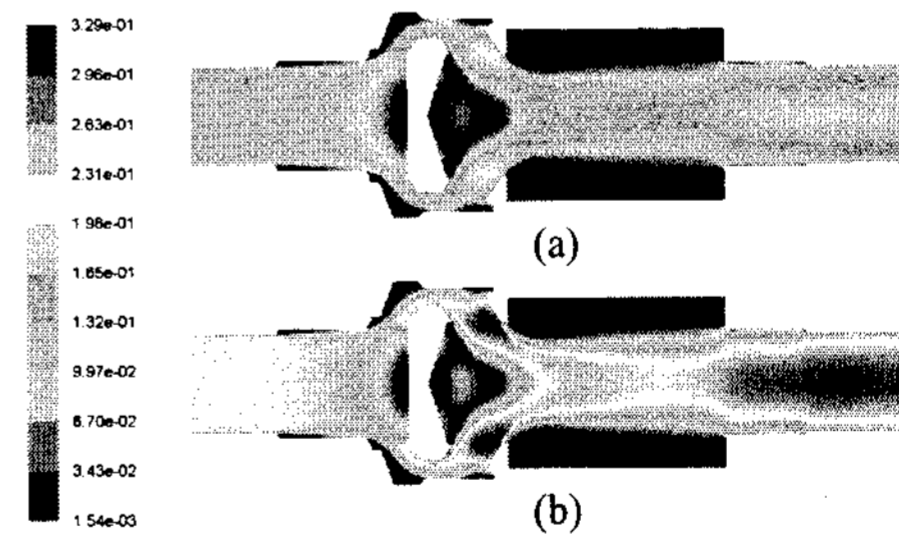


Fig. 8 Mach number distribution, inlet : 70bar, outlet : (a) 65bar, (b) 60bar

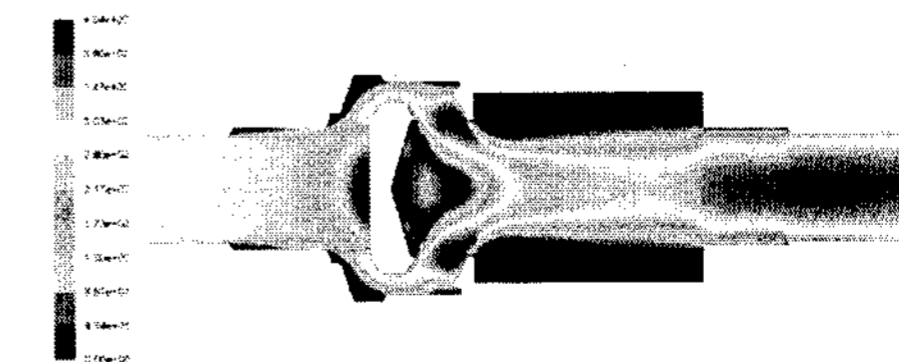


Fig. 9 Velocity distribution, inlet : 700bar, outlet : 600 bar

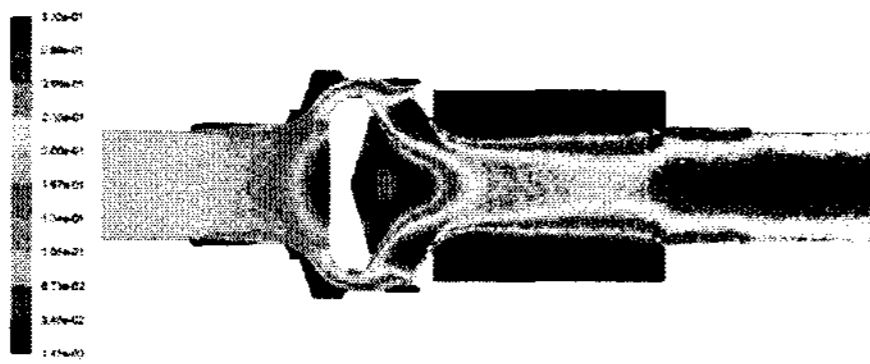


Fig. 10 Mach number distribution, inlet : 700bar, outlet : 600bar

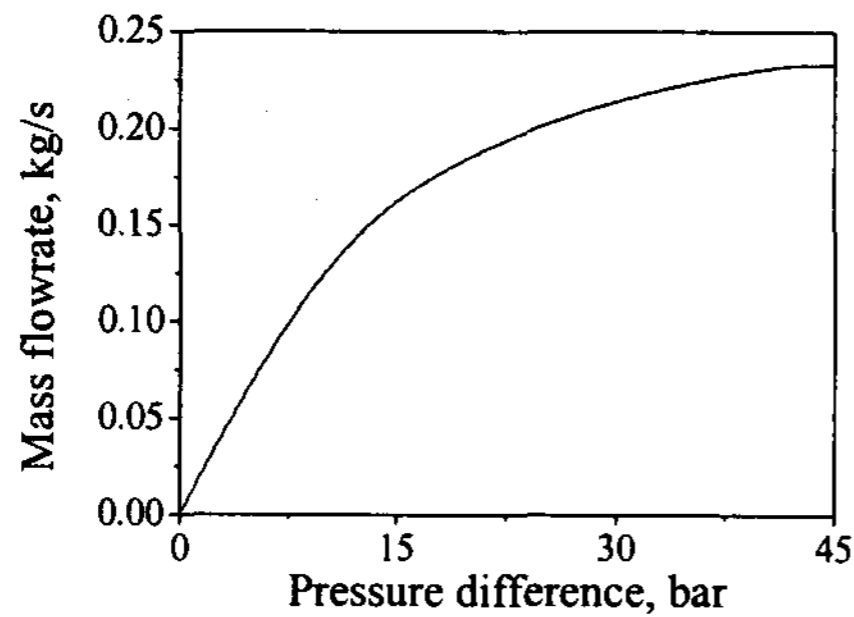


Fig. 11 Variation of massflow rate with charging pressure difference, inlet : 70bar

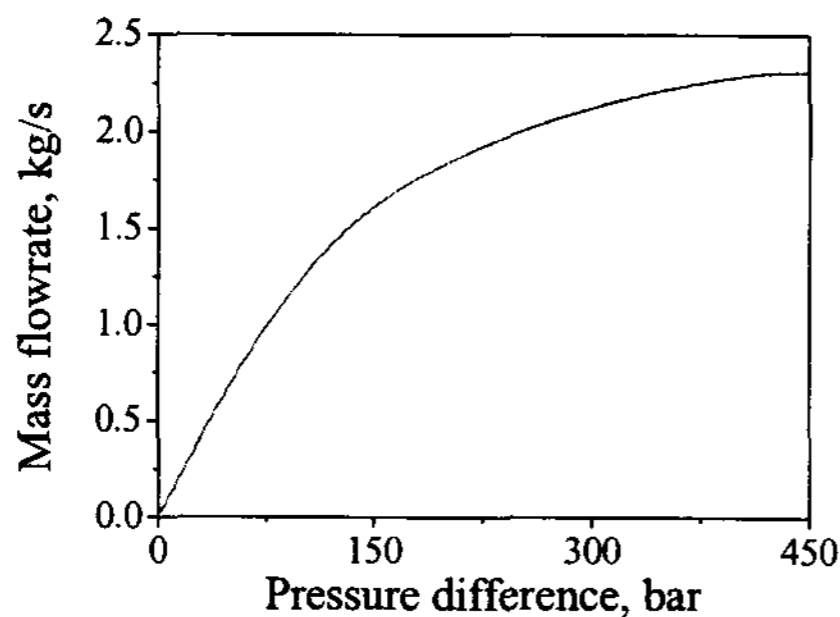


Fig. 12 Variation of massflow rate with charging pressure difference, inlet : 700bar

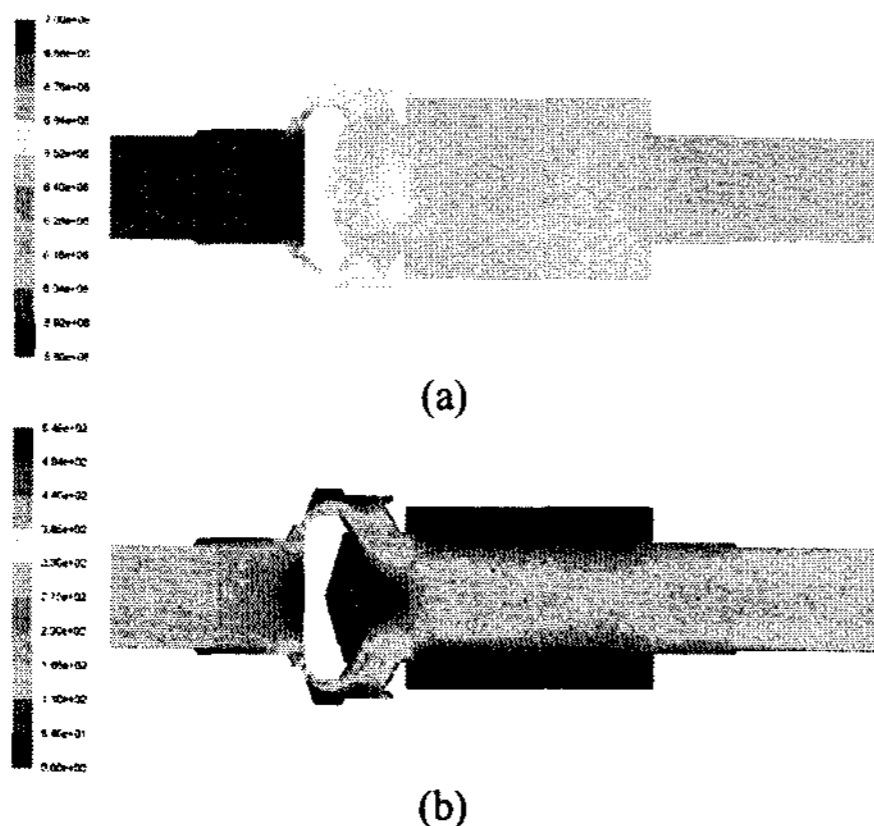


Fig. 13 Distribution of (a) static pressure, (b) velocity. Poppet 1/4 opened, inlet : 70bar, outlet : 65bar

Fig.13에는 저압에서 충전이 시작된 직후인 포핏이 1/4정도 열렸을 때의 정압분포와 속도분포를 나타내었다(Fig.6(a)와 Fig.7(a)는 완전히 열린 경우의 결과임). 입·출구간의 차압은 작지만 포핏과 시일 사이의 간극이 아주 좁기 때문에 여기서 최고 유속과 함께 대부분의 압력강하가 발생하고 있다. 특히, Fig.6(a)의 결과와는 달리 포핏이 열리는 경우에는 시일에 작용하는 압력분포가 크게 달라지며, 이로 인하여 CNG 충전용 체크밸브의 경우와 동일하게 시일이 이탈될 수도 있다^(4,5). 따라서, 충전초기에 시일의 이탈을 방지할 수 있는 설계변경이 요구된다.

4. 결론

본 논문에서는 연료전지 자동차의 고압수소충전라인용 체크밸브에서 발생할 수 있는 문제들의 원인을 규명하기 위하여 열·유체해석 상용 프로그램인 FLUENT를 사용하여 입·출구부의 압력과 압력차이 등에 따른 유동특성을 상세하게 조사하였다. 이 결과, 수소충전용 체크밸브에서는 입구부 압력과 함께 입·출구간 차압의 크기가 유동특성에 아주 큰 영향을 미쳤다. 특히, 고압의 수소충전시에는 초우킹의 발생과 이로 인한 제반문제의 발생을 회피하기 위해서는 저압에서 고압으로의 단계별 충전이 필수적임을 알 수 있었다. 또한, CNG 충전용 체크밸브의 경우와 동일하게 충전초기에 시일이 이탈할 수 있기 때문에 이를 방지하기 위한 설계변경이 요구된다. 따라서, 본 논문에서 사용한 해석 방법과 결과는 수소충전 시스템을 구성하는 제반부품의 설계와 성능예측에 크게 기여할 수 있을 것으로 기대된다.

후기

이 논문은 2007년도 지방대학혁신역량강화사업에 의하여 지원되었음을 밝힙니다.

References

- [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] Gato, L. M. C. and Herniques, 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.
- [4] 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.
- [5] 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.
- [6] K. S. Hwang and D. K. Ko, 2003, "Dust Cleaning Technology of Reform Tub Zone at Wire Rod Mill Plant," Trans. of RIST, pp.359-368.