



수소충전소용 유량제어 밸브의 차압에 따른 유동특성에 대한 수치해석적 연구

남충우 · †김락민 · 김현호*

한국자동차연구원 수소저장충전연구센터, *(주)하이플릭스
(2019년 12월 04일 접수, 2021년 3월 8일 수정, 2021년 4월 16일 채택)

A Numerical Study Of Flow Control Valve to Flow Characteristics by Pressure Difference for Hydrogen Station

Chung-Woo Nam · †Rak-Min Kim · Hyun-Hyo Kim*

Powertrain Efficiency R&D Center, KATECH, Chungnam Cheonan, Korea

*Dept. of R&D, HIFLUX LTD., Daejeon, Korea

(Received December 4, 2019; Revised March 8, 2021; Accepted April 16, 2021)

요약

최근 친환경 자동차에 대한 관심이 높아짐에 따라 공해물질을 배출하지 않는 수소연료전지 차량에 대한 관심과 구매가 증가하고 있다. 최근 정부의 수소에너지 보급정책에 따라 수소충전소의 확충과 핵심부품의 국산화를 지원하고 있다. 본 연구에서는 그중에서도 수소 유량제어 밸브의 차압에 따른 유동특성을 연구하였다. 차압이 높아짐에 따라 질량유량과 유량계수는 체적유량과 다른 경향을 보임을 확인하였다. 그리고 병목 구간에서의 노즐효과로 인해 수소온도에 영향을 주게되고, 밀도의 변화를 일으켜 질량유량에 영향을 주게 되는 것을 확인 하였다.

Abstract - With the recent growing interest in eco-friendly cars, as interest in eco-friendly cars increases, interest and purchase of hydrogen fuel cell vehicles that do not emit pollutants are increasing. Recently, the government is supporting the expansion of hydrogen charging station and localization of core parts according to the government's hydrogen energy dissemination policy. In this study, the flow characteristics of the hydrogen flow control valve were investigated. As the differential pressure increases, the mass flow rate and flow coefficient tend to be different from the volume flow rate. And it was confirmed that it affects the hydrogen temperature due to the nozzle effect in the bottleneck section, and the change in density affects the mass flow rate.

Key words : flow control valve, flow coefficient, range ability, pressure difference, hydrogen station, computation fluid dynamics

1. 서론

최근 친환경 자동차에 대한 관심이 높아짐에 따라 공해물질을 배출하지 않는 전기(EV) 및 수소차량(FCEV)에 대한 관심이 높아지고 있다. 그리고 이에 따라 실제적인 구매의 증가로 이어지고 있는 실정이다.

다. 최근 정부의 수소에너지 보급정책으로 인하여 수소 충전소 및 충전장치에 대한 수요가 증가하고 있으며, 2019년 전국에 22개소가 운영되고 있다. 환경부, 국토부, 산업통상자원부의 합동발표에 따르면 2022년까지 320개의 충전소 운영계획을 제시하였다. 실제 이러한 설비기술의 대부분은 해외기술에 의존하고 있다. 실제로 차량을 위한 밸브 및 고압장비에 대한 연구는 활발히 진행되고 있지만 충전설비를 위한 연구는 해외에 비하여 Jin, Z 외[1]의 사례에 비하여 현재

†Corresponding author:rmkim@katech.re.kr
Copyright © 2021 by The Korean Institute of Gas

미진한 실정이다. 수소 충전소의 핵심부품의 국산화 현황은 약 40%에 불과하며, 수입에 소요되는 높은 비용은 수소충전소의 보급을 늦추는 원인으로 지적되고 있다. 근래의 수소관련 사고로 인한 고압 수소의 위험성은 대중에게 널리 알려져 있으며, 운용과 시험에 대한 위험성을 줄이기 위하여 수소의 특성에 따른 선행연구가 활발히 진행중에 있다.

본 연구에서는 수소충전소용 유량제어 밸브의 차압에 의한 유동특성을 수치해석적 연구를 진행 하였다. 밸브의 차압과 열량에 대한 유량, 온도변화 등을 기반으로 유량계수와 유량비를 예측하였다.

II. 수치해석

본 연구에서의 유량제어 밸브의 차압에 따른 유동 특성에 대한 수치해석적 연구를 수행하였다.

2.1. 수치해석 방법

본 연구에서는 Fig. 1과 같은 유량제어 밸브에 대한 유동 특성을 예측하기 위하여 상용 CFD 프로그램인 STAR-CCM 13을 사용하였다. 압축성 유동해석을 위한 연속, 운동량 및 에너지 방정식은 다음과 같다.

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

$$\frac{\partial}{\partial x_i}(\rho u_i) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho u_i u_j) = -\frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{\partial \tau_{ij}}{\partial x_j} + \rho F_i \quad (2)$$



Fig. 1. Flow Control Valve for hydrogen station

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho E) + \frac{\partial}{\partial x_i} [u_i(\rho E + p)] = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(k + \frac{c_p \mu_t}{Pr_t} \right) \frac{\partial T}{\partial x_j} + u_i \tau_{ij} \right] \quad (3)$$

$$\partial \tau_{ij} = \mu_{eff} \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} - \delta_{ij} \frac{2}{3} \frac{\partial u_k}{\partial x_k} \right) \quad (4)$$

$$\mu_{eff} = \mu + \mu_t \quad (5)$$

수소충전소용 유량제어밸브 내부유동의 전단응력에 대한 계산을 위하여, 난류모델은 k- ω standard(Wilcox) 모델을 사용하였다. 그리고 밸브에서의 직경변화에 따른 온도변화(Joule-Thompson EQ)를 예측하기 위해 기존 수소와 물성치가 비슷한 기체를 대상으로 한 논문[7], [8]을 참고하여 실제기체(Peng-Robinson Method)방정식을 적용하였다.

$$p = \frac{RT}{V_m - b} - \frac{a(T)}{V_m(V_m + b) + b(V_m - b)} \quad (6)$$

지배방정식들에 대하여 유동과 열에너지에 대하여 복합적 계산기법(Coupled method)이용하였다.

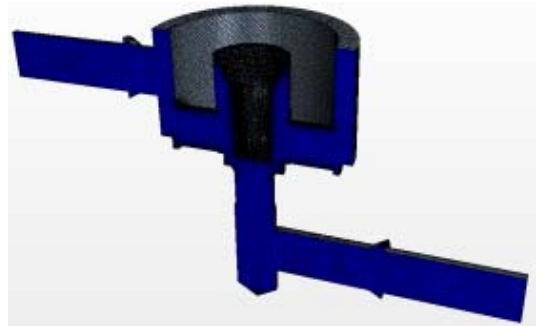


Fig. 2. Computational grid on inner channel

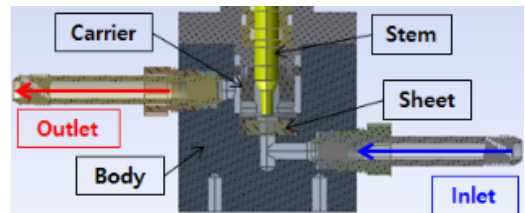


Fig. 3. Computational grid on inner channel

2.2. 수치해석 모델

수소 유량밸브의 내부 유로는 Fig. 2와 같은 형상으로 이루어져 있으며, Fig. 3의 그림과 같이 입구에서 시작되는 유동이 과 시트사이를 지나 캐리어를 거쳐 출구로 토출되는 구조이다. 밸브의 입출구의 직경은 9.525mm(3/8") 선정하였다. 밸브를 개폐하는 Stem과 Sheet의 직경 및 최대 상하변위(Stroke)등의 세부사항은 Table 1.과 같이 설정하였다.

국제 규격인 SAE J2601[6]의 제어 규격을 만족하기 위하여, 목표 유량을 60g/s 설정 하였다. 이를 만족하기 위해 가스용 밸브 규격[3],[5]을 참고하였으며, Table 1.과 같이 밸브 내에서 상하로 움직이며 유량을 제어하는 stem은 이 12mm로 설정되었으며, 밸브의 내압 성능을 제어하는 sheet는 10mm로 설계 되었다.

2.3. 물성치 및 사양

2.4. 유량계수 및 유량비

가스에서의 유량계수는 차압과 온도변화 그리고 체적유량에 따라 달라지며, 일반적인 밸브의 경우 유

Table 1. Specification of Flow Control Valve

	Value
Stem Diameter	12(mm)
Sheet Diameter	10(mm)
Stroke	15(mm)
In/Out	9.525(mm)

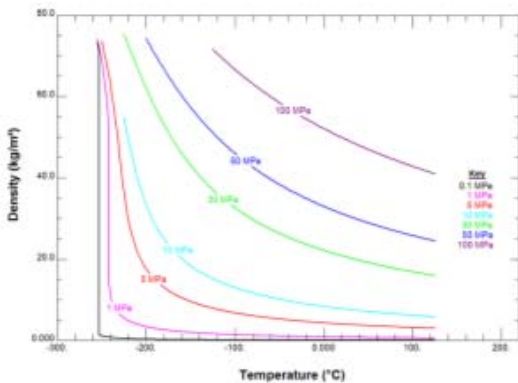


Fig. 4. Hydrogen Density chart (Ref. U.S.Energy Department Report)

량계수는 최대유량만을 지칭하는 것과 동시에, 액체에 의한 유량계수는 실제 수소와 같은 압축성 기체의 유량을 예측하는 용도에는 맞지 않아, ISA 표준[2] 중 압축성 유체에 대한 환산식을 이산화 하여 유량계수를 사용하였다.

$$\text{If } P_{outlet} > \frac{P_{inlet}}{2} \tag{7}$$

$$CV = \frac{Q}{4140} \sqrt{\frac{G_g(273+t)}{(P_1 - P_2)P_2}}$$

$$\text{If } P_{outlet} \leq \frac{P_{inlet}}{2} \tag{8}$$

$$CV = \frac{Q}{4140 P_{inlet}} \sqrt{G_g(273+t)} \tag{9}$$

$$MFR_{ratio} = MFR / MFR_{max}$$

III. 결 과

경계 조건은 밸브입구의 압력을 100 MPa로 하고 출구의 압력을 변경하였다. 차압은 실제 충전상황에서 발생할 수 있는 0.3~30 MPa까지의 차압에 대하여 수치해석을 진행하였다.

2.1. 유동 경향

유량 제어밸브의 차압의 대한 유동장의 형태는 차압의 크기와 상관없이 Carrier의 형태에 의해 크게 변하지 않는 것을 Fig. 5와 Fig. 7에서 확인할 수 있다. 차압이 증가하면서 Fig.6의 온도분포가 Fig. 8과 같이 유동이 느린 Body와 Carrier사이 부분과 Carrier 직후에 온도 상승을 확인하였다. J. W. Song[9]이 발표한 자료를 참고하여 대조하였을 때, 밸브 가이드와 차압에 따른 온도 특성의 변화를 확인할 수 있었다.

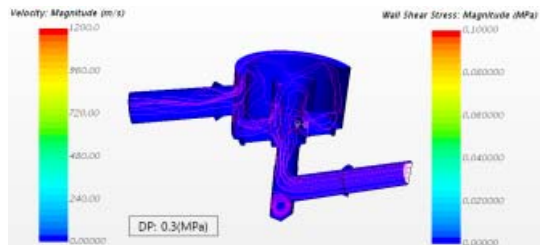


Fig. 5. Stream line & Wall Shear Stress (DP: 0.3 MPa)

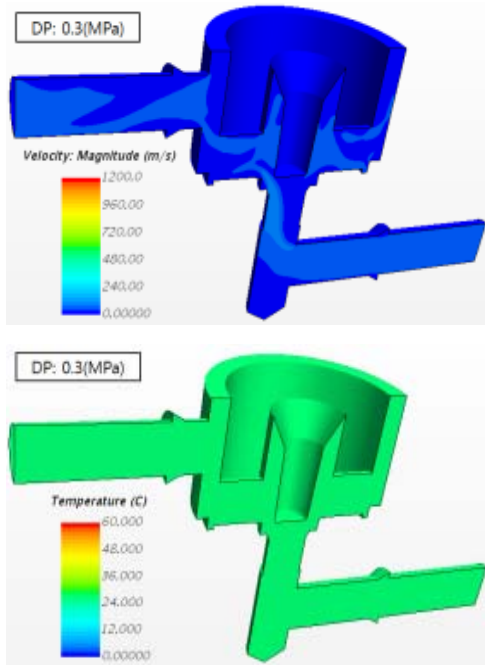


Fig. 6. Velocity & Temperature Distribution on Vertical Cross Section (DP: 0.3 MPa)

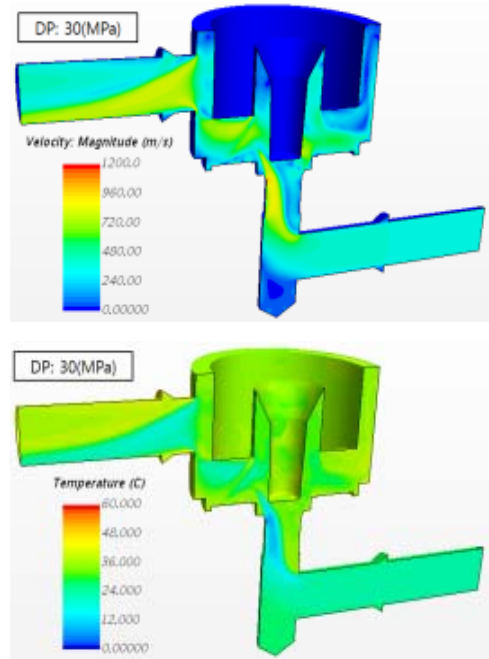


Fig. 8. Velocity & Temperature Distribution on Vertical Cross Section (DP: 30 MPa)

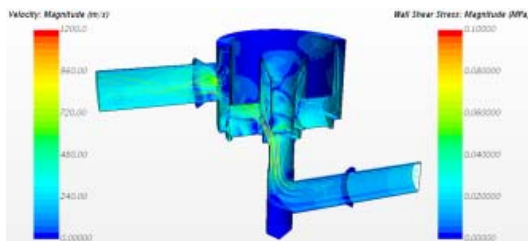


Fig. 7. Stream line & Wall Shear Stress (DP: 30 MPa)

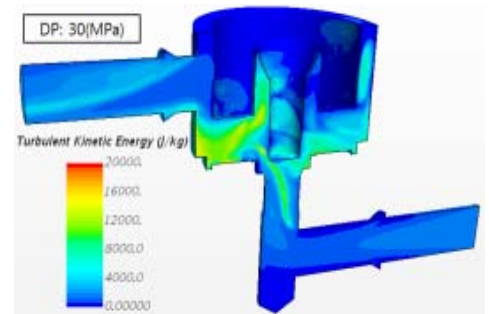
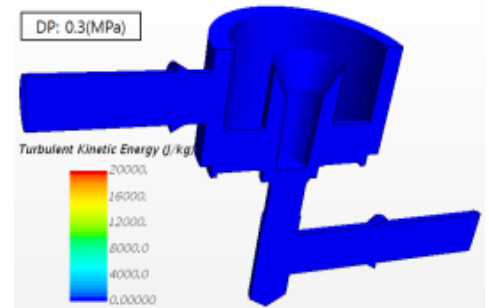


Fig. 9. Turbulence Kinetic Energy Distribution on Vertical Cross Section

차압에 의한 유동에서, Stem과 Sheet의 모서리에서 노즐효과가 Fig. 8과 같이 수소의 온도변화에 큰 영향을 주는 것을 확인하였다. 전단응력은 Fig. 5와7, 난류에너지는 Fig. 9로 온도경향과 일치하였다.

수소 유량제어 밸브의 차압이 증가함에 따라 질량 유량은 Fig. 10의 형태로 증가함을 확인할 수 있다.

차압이 증가함에 따라 Fig. 11에서 보이는 체적 유량과 밀도의 경향을 통해 노즐효과가 발생함을 확인하였고, 온도는 Fig. 12에서와 같이 30MPa의 차압에서 최대 7도가량 상승함을 확인할 수 있다.

Fig. 13와 같이 질량유량비율과 체적유량비율을 비교

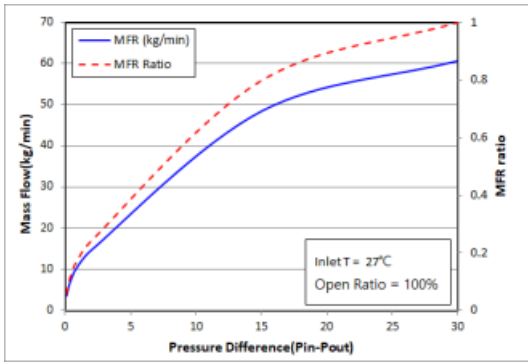


Fig. 10. Mass Flow and Ratio Plot for Pressure Difference

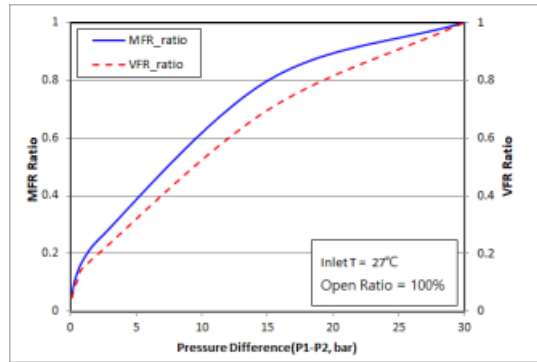


Fig. 13. Mass and Volume Flow Ratio Plot for Pressure Difference

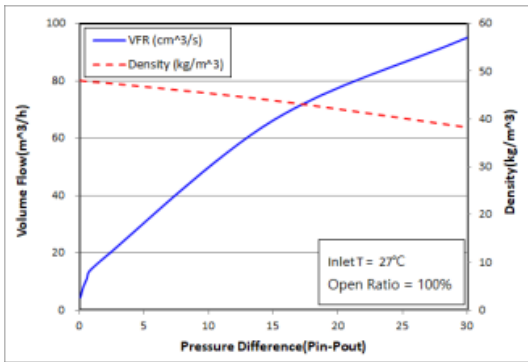


Fig. 11. Volume Flow and outlet Density Plot for Pressure Difference

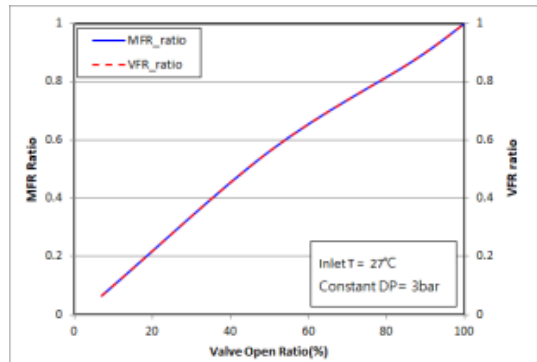


Fig. 14. Mass and Volume Flow Ratio Plot for Valve open Ratio

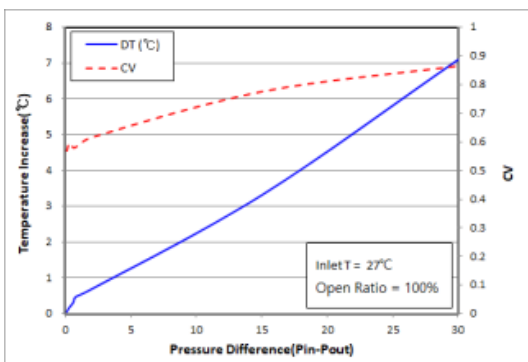


Fig. 12. Temperature Increase and CV Plot for Pressure Difference

하였을 때, 체적유량은 거의 선형으로 증가하는 반면, 질량유량은 2차원 곡선의 형태로 증가하는 것을 확인

하였다. 그리고 차압이 적은 구간에서는 Fig.14와 같이 질량과 체적유량의 증가량이 동일하게 증가하였다.

VI. 결론

본 논문에서는 수소충전소용 유량조절 밸브의 입구와 출구의 차압에 따른 유동특성을 수치해석 기법으로 연구하였다. Stem과 Sheet사이의 지나는 유동은 Carrier를 통하여 출구로 나가는 방식의 구조에서는 차압에 따른 특별한 유동형상의 차이는 거의 발생하지 않았다. 차압이 증가함에 따라 Stem 주위의작은 틈을 지나면서 발생하는 노즐효과에 의한 온도 변화로 수소의 온도변화폭이 증가함에 따라 질량유량에 대한 경향은 체적유량과 다른 양상을 보이게 되는데, 앞서 연구된 수소의 차압에 따른 유동경향을 연구한 Qian, J[11]의 논문에서와 같이 온도변화에 따른 밀도의 변화가 원인으로 확인되었다.

감사의 글

본 연구는 산업통상자원부, 한국에너지기술평가원의 지원을 받은 에너지기술개발사업(20183010041940, 700bar 수소 충전소용 사용압력 1,000bar급 대유량 유량 제어밸브, 피팅 및 역류방지밸브 국산화 개발)과 자동차산업핵심기술개발사업(10080284, 승용 Turbo CNG 엔진의 핵심제어알고리즘 및 ECU개발)의 일환으로 수행된 연구결과로 이에 감사드립니다.

사용기호

Q : Volume Flowrate (m^3/h)

P : Pressure (MPa-abs)

t : Temperature ($^{\circ}C$)

G_g : Gas specific gravity (Air = 1) = 0.0696

C_v : Flow Coefficient

μ : Compressibility

REFERENCES

- [1] Jin, Z. J, Chen, F. Q, Qian, J. Y, M., Chen, L. L., Wang, F., Yang, F., "Numerical analysis of flow and temperature characteristics high multi stage pressure reducing valve for hydrogen refueling station", International Journal of Hydrogen Energy, Vol.41, p5559-5570(2016)
- [2] Flow Equations for Sizing Control Valves, ISA-75.01.01-2007 (1995)
- [3] Fujikin LTD., "Valves & Fitting for ultra high-pressure hydrogen gas", 2017 edition, (2017)
- [4] Fueling Protocols for Light Duty Gaseous Hydrogen Surface Vehicles, SAE J2601_201612 (2016)
- [5] Randall W. White sides, "Selection and sizing pressure relief valve", www.pdhcenter.com, (2008)
- [6] Gaseous hydrogen-Fuelling stations Part 3: Valves, ISO 19880-3:2018,(2018)
- [7] J.W. Seo, J. H. Lee, J. Y. Kang, C. G. Lee, D. Y. Lee, "A study on the performance characteristics of the regulator for CNG vehicles according to the pressure control method", KIGAS, Vol. 2016 (5), p156, (2016)
- [8] K. M. Kwak, J. H. Lee, Y.D. Yeo, T. H. Jang, "The Development of Needle Valve for Hydrogen Station of 700bar", KSMPE, Vol. 2018(4), p45, (2018)
- [9] J. W. Song, W. J. Lee, S. M. Kim, "Flow-Structure interaction 2 Stage Pressure Reduction Hydrogen Regulator", KSMTE, Vol. 2019(2), p189, 2019
- [10] K. M. Kwak, "Introduction of Valve Technology for Hydrogen Station", KIGAS, Vol. 2018(5), p117, (2018)
- [11] Qian, J. Y., Liu, B. Z., Lei, L. N., Zhang, H., Lu, A. L., Wang, J. K., Jin, Z. J., "Effects of orifice on pressure difference in pilot-control globe valve by experimental and numerical methods", International Journal of Hydrogen Energy, Vol. 41, p18562-18570,(2016)
- [12] Baba, G. A., Norsarahaida, A., "The effect of water hammer on pressure oscillation of hydrogen natural gas transient flow", Applied Mechanics and Materials, 2014, Vol.554, p251-255,(2014)