

수소전기차용 700 bar 수소충전노즐의 노즐형상을 고려한 최적설계에 관한 연구

백진욱*[§], 광기명*[§], 김남용*, 조용민**, 류성기*^{#,}

*경상대학교 기계항공공학부, **천마기계(주)

Study on the Optimal Design of the Nozzle Shape of the 700 bar Hydrogen Refueling Nozzle for Hydrogen Electric Vehicles

Jin-Uk Baek*[§], Gi-Myung Gwak*[§], Nam-Yong Kim*, Yong-Min Cho**, Sung-Ki Lyu*^{#,}

*School of Mechanical & Aerospace Engineering, Gyeongsang National University,

**Chunma Machine CO., Ltd.

(Received 08 April 2022; received in revised form 15 April 2022; accepted 21 April 2022)

ABSTRACT

In this study, we analyze the flow characteristics according to the internal shape of a 700bar hydrogen charging gun for hydrogen electric vehicles. When charging hydrogen, it receives a high-pressure charging pressure. At this time, we analyze the flow characteristics according to the shape of the nozzle and find the shape of the nozzle that minimizes energy loss. Ultimately, the optimal design of the nozzle was obtained by comparing the pressure difference between the inlet pressure and outlet pressure under a fixed mass flow condition.

Keywords : Flow Simulation(유동 시뮬레이션), Hydrogen(수소), Hydrogen Refueling(수소충전), CFD(전산유체해석), Pressure Drop(압력강하)

1. 서론

본 연구에 적용되는 수소충전노즐은 수소연료전지 차량에 수소를 충전하는 장치로 최대 700bar의 고압과 평균 -31°C 의 온도를 견뎌야 하는 장치이

다. 최근 탄소중립 실현을 위한 Net-Zero 2050이 전 세계적 과제가 됨에 따라 친환경 에너지원이 각광 받고 있다. 수소는 우주 질량의 75%를 차지할 정도로 풍부하여 고갈에 대한 우려도 적으며, 기체상태의 수소를 액화수소로 냉각하면 800배나 줄어들기 때문에 저장과 보관이 용이해진다. 이러한 이유로 인해 수소는 미래 핵심 에너지 자원으로 각광 받고 있으며 수소 생태계 구성을 통해 탈탄소 사회를 만들어 나갈 중요한 기술력으로 꼽힌다.^[1-2]

Corresponding Author : sklyu@gnu.ac.kr

Tel: +82-55-772-1632, Fax: +82-55-772-1578

§ These authors equally contributed to this work as first author

수소 충전에는 ‘수소 충전 프로토콜’이라는 것이 있다. 수소전기차는 기존 내연기관차와의 경쟁력을 가지기 위해 빠른 충전 시간과 충분한 주행거리를 요구한다. 이를 위해서는 약 700bar이라는 초고압 충전을 필요로 한다. 이를 안전하게 충전하기 위해서는 기존의 내연기관차의 유류 충전과는 차원이 다른 기술을 요구하게 된다. 따라서 이를 해결 하기 위한 것이 수소 충전 프로토콜이다. 현재 다양한 수소 충전 프로토콜이 존재하며, 일반적으로 충전가스의 온도 범위는 -30~-40°C이며, 충전율은 95%로 명시하고 있다. 또한, 충전용량에 따라 충전 속도를 정하고 있다. 충전속도는 질량유량밸브를 이용해 20g/s~120g/s 등 다양한 속도로 충전되고 있다. 따라서 다양한 프로토콜을 만족할 수 있고, 충전을 위한 고압펌프의 부하를 줄일 수 있도록 하는 수소충전노즐의 최적설계가 필요하다.^[3-8]

본 설계는 수소충전노즐의 노즐부분의 형상을 변경하는 설계를 통해 충전 효율성에 초점을 두었다. 설계모델에 있어서 구조해석을 통해 안정성을 검토하였으며, 유동흐름에 있어 일정한 질량유량을 전달하기 위한 입력압력 차이를 통해 효율성을 검증하였다.

본 연구에서는 수소전기차량 충전에 많이 사용되고 있는 WEH사의 수소충전노즐을 바탕으로 상용기계요소 설계 및 검증프로그램인 Inventor를 사용하여 모델링 구축을 하였고 Solidworks를 사용한 구조해석 및 CFD(Computational Fluid Dynamics) 유동특성 검증해석을 진행하였다. 내부 노즐형상의 영향을 고려하여 최적설계를 수행하였다.

2. 수소충전노즐 구조 및 연구방법

2.1 수소충전노즐 구조

기존 수소충전노즐의 제품 이미지와 투시도를 Fig. 1에 나타냈다. 노즐부분의 급격한 유동방향 전환에 의해 부차적 손실이 발생할 것으로 보였다.

엘보우 형상에 의한 부차적 손실문제를 해결하기 위하여 기존 노즐의 형상을 변경하여 부차적 손실을 최소화할 수 있는 노즐 구조를 설계하였다. 새로운 노즐의 구조 및 유동특성을 검토 및 보완하기 위하여 수치해석을 수행하였다.



(a) WEH hydrogen refueling gun product



(b) Perspective view of hydrogen refueling gun

Fig. 1 Conventional hydraulic quick coupler

2.2 연구방법

수소가 충전노즐을 통해 차량 수소탱크로 전달 될 때는 수소충전 프로토콜에 의해 충전속도가 고정된다. 즉 질량유량이 고정된 조건에서 입구와 출구의 압력차에 의해 충전이 진행된다.

수소의 특성상 밀도와 점도가 매우 낮기 때문에 상대적으로 속도가 낮은 부분은 형상이나 표면조도에 많은 영향을 받지 않는다. 그러나 압력이 급격히 강하하면서 고속으로 분사되는 노즐부분은 형상에 영향을 더 많이 받게 되어 발생하게 된 부차적 손실에 의해 수두손실이 발생한다. 그 결과 더 높은 입구압력을 요구하게 되고 궁극적으로 압력펌프와 충전장치에 많은 부하를 주게 된다.

$$\frac{p_1}{\rho} + \frac{V_1^2}{2} + gz_1 = \frac{p_2}{\rho} + \frac{V_2^2}{2} + gz_2 \quad (1)$$

$$\left(\frac{\gamma}{\gamma-1}\right) \frac{p}{\rho} + \frac{V^2}{2} + gz = Constant \quad (2)$$

$$\left(\frac{\gamma_1}{\gamma_1-1}\right)\frac{p_1}{\rho_1} + \frac{V_1^2}{2} + gz_1 = \left(\frac{\gamma_2}{\gamma_2-1}\right)\frac{p_2}{\rho_2} + \frac{V_2^2}{2} + gz_2 + h_l \quad (3)$$

$$h_l = f \times \frac{2V^2}{g} \times \frac{l}{d} \quad (4)$$

$$h_l = \left(f \times \frac{2V^2}{g} \times \frac{l}{d}\right) + k \frac{V^2}{2g} \quad (5)$$

이론적으로 운동량 보존을 이용하게 되면 식 (1)과 같은 베르누이 방정식을 유도할 수 있다. 그러나 수소는 압축성 유체이기 때문에 밀도를 상수로 두지 않고 적분하여 방정식을 유도하면 식 (2)와 같다. 여기서 수두손실이 발생하게 식 (3)과 같이 방정식이 정리된다. 여기서 아래첨자 1과 2는 충전노즐의 입구와 출구를 의미한다. h_l 는 손실수두로 패닝의 법칙과 부차적 손실로 표현할 수 있다. 식 (4)를 패닝의 법칙이라고 하며 비압축성, 압축성 유체에 공통으로 사용되며 난류에서도 사용이 가능하다. 추가적으로 관로의 형상에 따른 부차적 손실도 고려해보면 손실수두는 식 (5)와 같이 나타낼 수 있다.

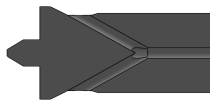
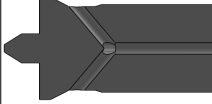
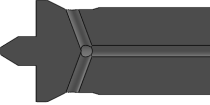
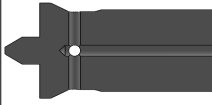
즉 압축성 유체의 방정식을 통해 알 수 있듯 수두손실을 최소화하면 입구와 출구의 상대압력을 줄일 수 있으며, 수두손실은 속도의 제곱에 비례하기 때문에 고속의 유동 구간을 개선하는 것이 더 효율적으로 수두손실을 줄일 수 있을 것으로 판단된다. 따라서 고속유동을 하는 노즐 부분의 형상 개선을 통해 최적 설계를 진행하였다.

3. 수소충전노즐 구조해석 및 유동해석

3.1 해석대상 및 모델

본 연구에 적용되는 수소충전노즐에 있어서 Table 1은 수소충전노즐의 내부유동흐름에 영향을 미치는 형상 중 노즐 부분을 나타내었다. 일반적으로 사용되는 피스톤형상 case 1과 개선을 위해 모델링한 것이 case 2이다. case 2는 부차적 손실을 발생시키는 엘보우 형상의 각도를 변경하여 수두손실을 최소화할 수 있도록 적절한 형상을 설계하였다. 최적 각도

Table 1 Information of 4 kinds of nozzle design

Nozzle Modeling		
Shapes		
Angle(°)	30	50
Shapes		
Angle(°)	70	90

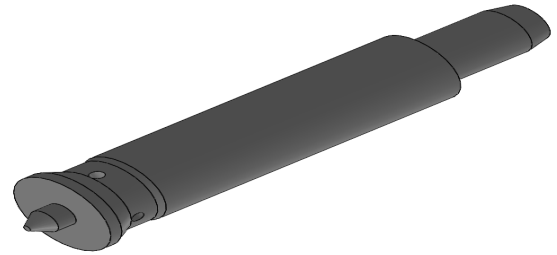


Fig. 2 Shape of nozzle

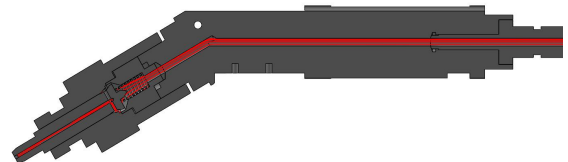


Fig. 3 Flow line of hydrogen refueling nozzle

값을 얻기 위해 30°~90°사이 값을 20°간격으로 해석을 하였다.

Fig. 2는 구조해석에 사용된 모델을 나타내며 Fig. 3은 유동해석에 사용된 모델에서 실제 내부 유체면적에 대한 셀을 나타낸다.

3.2 수소충전노즐 노즐 구조해석

Table 2는 스테인레스 316L 소재의 물성값이다. 구조해석 시 사용된 물성값은 수소경화가 낮아 일반적으로 사용되는 스테인레스 316L 소재를 적용하고 각 상태량은 온도 의존성 없이 일정한 것으로 하였

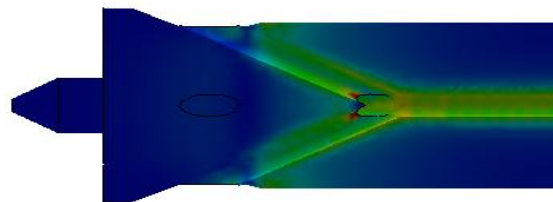
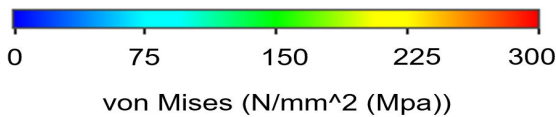
다.⁽⁸⁾ Solidworks 구조해석에 사용된 경계조건으로 70MPa의 내압을 Nozzle에 가하여 700bar 수소충전 시스템에 대해 사용되는 정격사용압력을 적용 및 확인하였다. Table 3은 위의 압력강하를 줄이기 위하여 4가지 형상을 모델링, 각 70MPa의 내압을 주고 해석한 결과이다.

Table 2 Stainless 316L properties

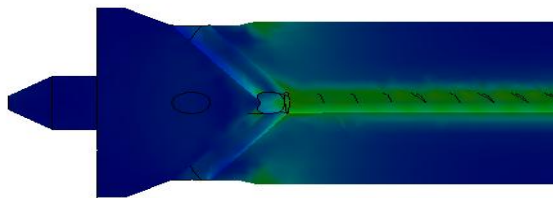
Properties	Metric
modulus of elasticity	193 GPa
Poisson's ratio	0.3
Density	8000 kg/m ³
Tensile strength	480 MPa
Yield strength	180 MPa

Table 3 Maximum stress for 4 types of nozzle

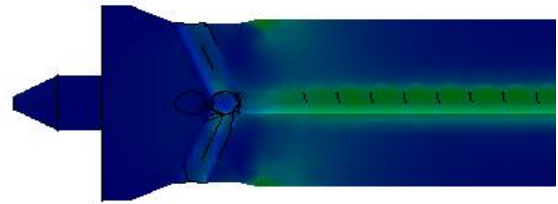
Angle	Max. Stress	Yield Stress
30°	288.7 MPa	180 MPa
50°	132.4 MPa	180 MPa
70°	134.5 MPa	180 MPa
90°	136.0 MPa	180 MPa



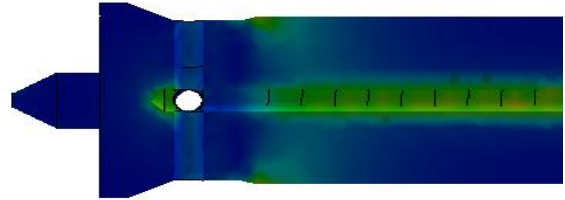
(a) 30



(b) 50



(c) 70



(d) 90

Fig. 4 Stress distribution at flow pressure of 70MPa

Fig. 4에서 확인할 수 있듯이 70MPa의 내압이 걸릴 경우 최대응력은 각각 288.7MPa, 132.4MPa, 134.5MPa, 136MPa로 나타났으며 30°일 때는 항복응력을 넘어서는 응력이 발생하였다.

개선을 위해 사용된 노즐모델 중에서 30°를 제외한 나머지 형상은 모두 항복응력 범위 내에 있으며, 그중 50°에서 가장 작은 최대응력을 보였다.

3.3 수소충전노즐 유동해석

Dassault사의 Solidworks 소프트웨어의 Flow simulation을 사용하여 유압 킥 커플러 내의 유동해석을 진행하였다. 해석에 적용되는 유체로는 Solidworks Flow Simulation 내 기체의 수소 정의를 사용하였다. 경계조건으로는 입구온도는 -31°C로 하였으며, 출구압력은 500bar로 설정하였다. 또한 일정한 질량유량 조건을 경계조건으로 주기 위해 입구의 질량유량을 0.02kg/s로 설정하였다. Table 3과 같이 동일한 경계조건에서 노즐의 형상을 변수로 설정하였다. 반복횟수는 유입구의 압력값이 수렴할 때까지 반복하도록 하였으며, 모든 조건들에 대해 똑같이 적용하고 해석 도중 수렴 시 그때의 값을 결과로 정하였다. 구조해석과 마찬가지로 노즐형상을 30°~90° 사이를 20°간격으로 설계하여 충전노즐에 조립 후 해석하였고 그 결과는 Table 4와 같다.

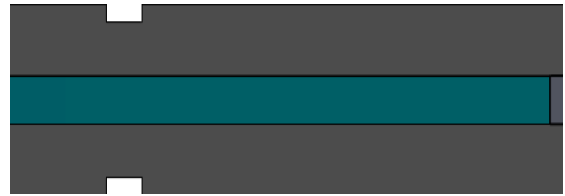
해석결과 Fig. 5는 유입구에 대한 유선과 압력을 나타낸 것이다. 50°에서 529.13bar로 가장 작은 입구 압력을 나타내었다. 즉 50°의 각도에서 가장 작은 수두손실을 보였음을 알 수 있다.

Table 3 Boundary conditions for flow simulations

Angle(°)	Inlet Mass Flow(kg/s)	Outlet Pressure(bar)
30	0.02	500
50	0.02	500
70	0.02	500
90	0.02	500

Table 4 Inlet pressure of nozzle

Angle(°)	Inlet Pressure(bar)
30	533.02
50	529.13
70	535.33
90	550.06



(c) 70

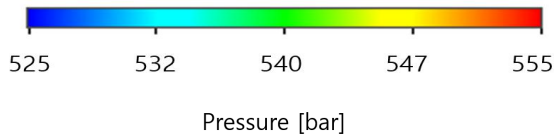


(d) 90

Fig. 5 Results of static pressure contour

Table 5 Analysis result of nozzle shape

Angle(°)	Max.Stress (MPa)	Inlet Pressure(bar)
30	288.7	533.02
50	132.4	529.13
70	134.5	535.33
90	136.0	550.06



(a) 30



(b) 50

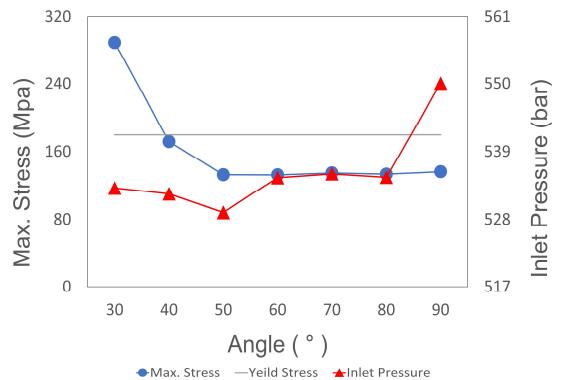


Fig. 6 Analysis result graph of nozzle shape

3.4 수소충전노즐 종합해석

수소충전노즐의 노즐의 형상에 따라 수두손실을 최소화 할 수 있을 것으로 예상되어 구조해석 및 유동해석을 한 결과는 Table 5와 같다. 입구압력이 낮

을수록 더 적은 수두손실이 발생하므로 입구압력이 낮은 형상이 더 최적화된 설계라고 볼 수 있다.

따라서 50°에서 가장 효율이 높으며, 구조적 관점에서 50°에서 항복응력 범위내에 있으면서 가장 작은 최대응력을 보이기 때문에 50°가 노즐의 최적각도라는 것을 알 수 있다. 이는 Fig. 6에서 그래프로 도식화하였다.

4. 결 론

본 연구에서는 수소전기차량의 수소충전을 목적으로 사용하는 700bar 수소충전노즐에서 일반적으로 차량에 충전시 발생하는 경계조건을 적용하여 설계의 타당성을 검증하였다. 그리고 수소충전노즐 노즐의 구조해석 및 충전노즐의 유동해석을 통해 노즐형상에 따른 유동특성을 연구하여 최적설계안을 도출하였다.

- 1) 수소충전노즐 대하여 노즐에 최대충전압력이 부여될 때 파괴 압력에 대한 응력 분포 및 최대응력점을 확인할 수 있었다.
- 2) 각 모델에 대한 최대응력값을 확인하고 항복응력 범위 내에 있는지에 대한 안정성을 확인할 수 있다.
- 3) 노즐의 구조해석 결과 30°에서 항복응력을 넘어서는 응력집중점을 발견하여 이 설계는 부적합하였음을 알 수 있었고, 50°, 70°, 90°의 경우 항복응력 범위내에 있었으며 그중 50°에서 가장 작은 최대응력을 보인다.
- 4) 충전노즐의 유동해석 결과 일반적으로 각도가 커질수록 입구압력이 높아졌으며, 50°에서 가장 낮은 입구압력을 보여주어 수두손실이 최소화 됨을 알 수 있다.
- 5) 구조해석과 유동해석을 종합한 결과 50°에서 가장 높은 효율과 안정성을 보여주었음을 알 수 있다.

후 기

본 논문은 산학연 Collabo R&D 사업화R&D(2단계) 사업 (과제번호 : S3096431)과 2022년도 정부(산업통상자원부)의 재원으로 한국에너지기술평가원의 지원(202140 0000520, 자원순환(재제조)산업 고도화 인력양성) 지원에 의해 연구되었으며 이에 감사드립니다.

REFERENCES

1. Chung, Y. C., "Role of Fuel Cell Power Plant in Hydrogen Economy", Korean Operations Research And Management Society, Vol. 38, No. 1, pp. 15-29, 2021.
2. Cheon, K., Kim, J. S., "Hydrogen Economy in Major Countries: Policies of Promotion and Lessons Learnt from Them", Journal of The Korean Society of Mineral and Energy Resources Engineers, Vol. 57, No. 6, pp. 629-639, 2020.
3. Chae, C. K., Kang, S. Y., Kim, H. N., Chae, S. B., Kim, Y. G., "Evaluation of Influential Factors of Hydrogen Fueling Protocol by Modeling and Simulation", Korean Hydrogen and New Energy Society, Vol. 30, No. 6, 2019, pp. 513-522, 2019.
4. Park, S. H., Kim, D. H., Ku, Y. J., Kim, P. J., Huh, Y. S., "Analysis of Operation Data Monitoring for LPG-Hydrogen Multi-Fueling Station", Journal of Energy Engineering, Vol. 28, No. 4, pp. 1~7, 2019.
5. Chae, C. K., Kim, Y. G., Chae, S. B., "An Analysis of the Effect of Pressure Ramp Rate on the Major Parameters of the Standard Hydrogen Fueling Protocol", KIGAS, Vol. 24, No. 1, pp. 23-32, 2020.
6. Society of Automotive Engineers (SAE), "Fueling protocols for light duty gaseous hydrogen surface vehicles (Standard J2601_201612)", 2016.
7. Deymi-Dashtebayaz, M., Farzaneh-Gord, M., and Rahbari, H. R., "Simultaneous thermodynamic simulation of CNG filling process", J. Chemical Technology, Vol. 16, No. 1, pp. 7-14, 2014.
8. Kim, H. K., Choi, Y. M., Kim, S. H., Shim, J. Y., Hwang, I. C., "The Evaluation of Hydrogen Leakage Safety for the High Pressure Hydrogen System of Fuel Cell Vehicle", Korean Hydrogen and New Energy Society, Vol. 23, No. 4, pp. 316-322, 2012.