

유동특성을 고려한 CNG 충전 노즐의 최적 설계에 관한 연구

곽기명*§, 백진욱*§, 김남용*, 조용민**, 류성기*.,#

*경상국립대학교 기계항공공학부, **천마기계(주)

A Study on Optimal Design of CNG Charging Nozzle Considering Flow Characteristics

Gi-Myung Gwak*§, Jin-Uk Baek*§, Nam-Yong Kim*, Yong-Min Cho**, Sung-Ki Lyu*.,#

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

**Chunma Machine CO., Ltd.

(Received 03 April 2022; received in revised form 16 April 2022; accepted 22 April 2022)

ABSTRACT

This study considered the internal flow considering the internal shape of the CNG filling nozzle, which is widely distributed in Korea. The CNG filling nozzle is the last part to pass through in the CNG filling process and has a significant influence on the filling efficiency. The mechanism was identified by disassembling the CNG filling nozzle and performing a flow analysis according to the mechanism. Consequently, the energy loss owing to eddy currents in the flow was determined, and modeling was proposed to reduce the energy loss by simplifying the shape and parts.

Keywords : Flow Simulation(유동 시뮬레이션), Compressed Natural Gas(압축천연가스), Compressed Natural Gas Charge(압축천연가스충전), CFD(전산유체해석), Pressure Drop(압력강하)

1. 서론

흔히 말하는 CNG, LNG연료는 천연가스의 보관 방법에 따라 분류된 천연가스의 명칭이다. CNG는 Compressed Natural Gas로 압축천연가스를 명칭하는 것으로 천연가스를 탱크에 압축하여 보관 및

운송을 하는 것을 말하며 LNG는 Liquefied Natural Gas로 액화천연가스를 명칭하는 것이다.^[1]

본 연구에서 적용되는 압축천연가스 충전용 노즐은 흔히 ‘CNG충전노즐’이라고 명칭되며 압축천연가스를 이송시키는데 최종적으로 가스가 통과하는 부품이다. CNG는 연간 약 10만 ton의 양이 소비될 만큼 많은 양이 이송되고 있으며(최종에너지 부문별 소비 : 수송 통계_통계청) 전국 약 50,000대의 천연가스 자동차가 운행되고 있다. 전국에 천연가스 충전소는 약 400기가 설치되어 운행되고 있

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

어 버스, 청소차, 자가용 등 여러 분야에서 사용되고 있다.^[2-4] 국내에서 이렇게 많이 사용되고 있지만 충전소나 자동차에 장착된 충전장치의 경우에는 아직 국내에서 생산을 하는 업체가 없다. 대부분의 경우에 충전노즐을 수입해서 사용하고 있고, 충전노즐의 수리 및 보수의 경우에도 외국의 업체에 맡기는 경우가 많아 큰 비용이 드는 것으로 확인되었다.

본 연구에서 적용되는 충전노즐의 경우에는 CNG 차량의 연료를 충전하는 충전노즐이 적용되며 현재 국내에 많이 보급되어있는 CNG충전노즐을 분해해 메커니즘을 알아보고 그 메커니즘에 맞게 유동해석을 진행하였으며 천연가스버스를 충전하는 과정을 가정하여 적용하였다.

Fig. 1은 CNG의 충전 과정을 표시한 계통도이다. 고정형 CNG 충전소의 경우에는 도시가스 배관에서 4bar의 압력으로 천연가스를 공급받는다. 이 가스를 압축기를 통하여 210bar로 저장용기에 압축하여 보관하게 된다. 그 후 충전기에서 190bar로 감압하여 차량을 충전한다. 실제 버스가 가스를 사용하고 충전소에 들어오게 되면 60~80bar의 압력에서 들어오게 된다. 충전노즐을 버스에 장착하여 이송을 시작하게 되면 24Nm³/min의 체적유량을 유지하면서 이송되며 충전기와 자동차 탱크 사이에 20bar에서 30bar의 압력 차이가 유지된다. 버스의 연료탱크에는 210bar의 압력을 저장할 수 있다. 하지만 안전상의 문제로 약 90%인 190bar의 압력까지만 주입하며 충전기의 190bar 압력 이상을 요구하는 경우에는 충전기 안에 포함된 압축기를 가동하여 차량연료탱크를 190bar로 충전한다. 최대 250bar까지 요구되며 충전기에서 250bar의 압력을 주어야 차량연료탱크에 190bar의 압력을 채워 넣을 수 있다.^[5]

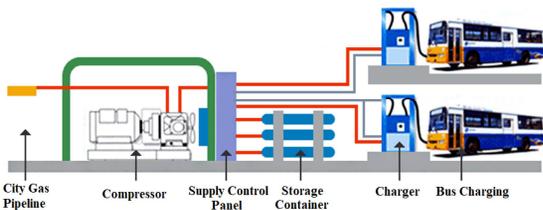


Fig. 1 Compressed natural gas filling process

본 연구는 기존의 CNG충전노즐의 3D모델을 상용 설계 프로그램인 CATIA를 사용하여 구축하고 설계 검증프로그램으로 SOLIDWRKS를 사용하여 CFD 유동해석을 진행하였다. 기존의 충전노즐의 유동특성의 결함을 찾고 내부형상을 수정하여 190bar 이상의 충전기 압력을 요구할 때 원래 요구했던 250bar보다 낮은 압력을 요구하게 설계함으로써 CNG 충전기의 효율을 높이고 경제성을 높인 제품의 모델링을 제시하였다.

2. 이론 및 연구방법

2.1 이론

천연가스는 주로 메탄으로 이루어져 있다. 저장용기에 저장되어있던 메탄은 충전기에서 24 Nm³/min으로 일정하게 제어되며 충전을 진행하게 된다. Nm³는 0°C 1기압의 상태에서 유체의 부피를 나타내는 단위로 주로 대량의 기체를 다루는 현장에서 많이 쓰는 단위이다. 저장용기에서 충전기로 210bar의 압력이 작용하고 그 압력을 충전기에서 최대 190bar로 감압하여 차량의 연료탱크에 천연가스를 주입하게 된다. 그 이상의 압력을 요구하게 되면 충전기의 압축기를 작동시켜 충전을 진행하게 된다. 모든 과정에서는 열교환기로 21°C로 유지시키므로 210bar, 21°C의 환경을 적용하여 위 단위를 환산하기 위해서 아래의 식 (1) Boyle Charle의 법칙을 적용해 단위를 환산하면 0.002051m³/s인 것을 알 수 있다.

$$\frac{P_1 V_1}{T_1} = \frac{P_2 V_2}{T_2} \quad (1)$$

$$\frac{P_1}{\rho} + \frac{V_1^2}{2} + gz_1 = \frac{P_2}{\rho} + \frac{V_2^2}{2} + gz_2 \quad (2)$$

$$\left(\frac{k}{k-1}\right) \frac{p}{\rho} + \frac{V^2}{2} + gz = Constant \quad (3)$$

$$\left(\frac{k_1}{k_1-1}\right) \frac{p_1}{\rho_1} + \frac{V_1^2}{2} = \left(\frac{k_2}{k_2-1}\right) \frac{p_2}{\rho_2} + \frac{V_2^2}{2} + h_i \quad (4)$$

$$h_L = \left(f \times \frac{V^2}{2g} \times \frac{l}{d} \right) + \sum_i \left(k_{L,i} \frac{V_i^2}{2g} \right) \quad (5)$$

$$f = \frac{64}{Re} \quad (6)$$

천연가스는 Fig. 2에서 나타낸 CNG충전노즐의 내부 구조를 따라 이송된다. 이때 천연가스의 입자가 가진 에너지의 합은 항상 일정하므로 에너지 보존법칙으로 유입구와 유출구의 압력과 유속은 식 (2)의 베르누이 방정식을 이용하여 계산할 수 있다.^[6] 밀도가 일정하게 유지되지 않는 압축성 유동인 것과 이송과정에서 온도가 21℃인 것을 고려하면 등엔트로피 유동으로 가정할 수 있으며 등온 가역 과정으로 베르누이 방정식을 유도하면 식 (3)과 같다. 식 (3)에서 k 는 비열비를 뜻하며 유동과정에서 손실을 고려하여 전단응력에 의한 마찰손실과 내부형상에 따른 손실을 고려하게 되면 식 (4)와 같이 표현된다. 이때 총 손실을 뜻하는 h_L 은 마찰손실과 부차적손실을 포함하고 있는데 총 손실은 식 (5)와 같다.

이때 식 (5)에서 f 는 Darcy-Weisbach 마찰계수로 난류유동과 층류유동에서 모두 적용이 가능한 계수이며 식 (6)으로 표현이 가능하다. 식 (5)에서 k_L 는 유동내부형상에 따른 손실계수로 여러 내부형상에 따라 결정되는 계수로 형상의 종류에 따라 정해진 계수를 모두 더하여 식에 적용하게 되며 k 는 유동내부형상에 따른 손실계수로 여러 내부형상에 따라 결정되는 계수로 형상의 종류에 따라 정해진 계수를 모두 더하여 식에 적용하게 된다.

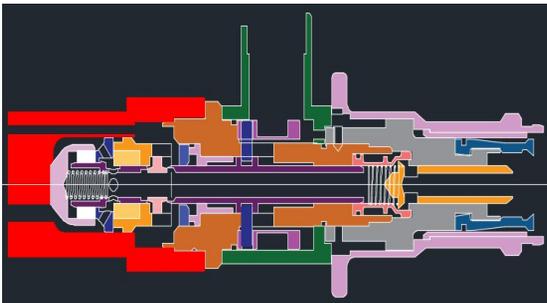


Fig. 2 Internal structure of CNG charger when refueling

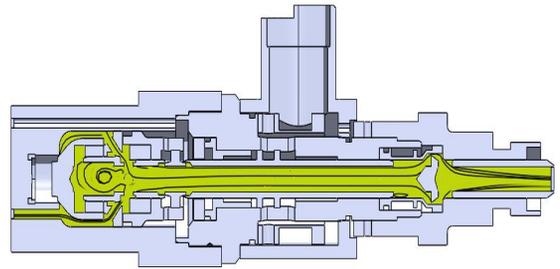


Fig. 3 Internal flow when refueling CNG charger

2.2 연구방법

충전노즐은 천연가스가 충전되는 과정에서 가장 마지막으로 통과하는 장비이다. 이 부품의 내부형상을 개선하여 압력강하를 줄이게 되면 충전기의 충전효율을 높여 경제성을 확보할 수 있다. 기체의 유동에서는 밀도가 매우 낮기 때문에 표면마찰이나 중력에 의한 영향은 적다.

하지만 기체의 유동에 따른 유선을 표시한 Fig. 3과 같이 불필요한 구조로 인한 부차적 손실이 많은 것을 볼 수 있다. 가장 높은 속도로 유입되는 입구 쪽 형상이 비교적 복잡한 것을 볼 수 있는데 이 부분에서 형상에 따른 부차적 손실이 발생한다. 식 (4)에 따라 손실을 줄이면 압력강하가 줄어드는 것을 확인할 수 있다.

3. CNG충전노즐 모델링 및 유동해석

3.1 해석 모델

부차적 손실을 줄이기 위해서는 CNG 충전노즐 내부의 밸브 형상을 간소화하는 것이 중요하다. Fig. 3에 표현된 기존제품의 경우에는 스프링이 들어가야 하는 자리와 조립을 고려하여 설계했지만 유체의 유동을 고려해서 부차적 손실을 줄일 경우 충전기의 효율을 높일 수 있다. Fig. 4를 보면 가장 높은 속도로 유체가 유입되는 유입구의 복잡한 형상으로 인해 와류가 발생하고 그로 인해서 부차적 손실이 발생하는 것을 알 수 있다.

Fig. 5는 내부형상과 부품을 간소화하여 부차적 손실을 줄인 설계를 표현한 그림이다. 유입구의 위치를 바꾸어 유체가 흐르는 경로에 형상을 줄이고 조립되는 부품을 하나로 줄여 와류를 개선하였다.

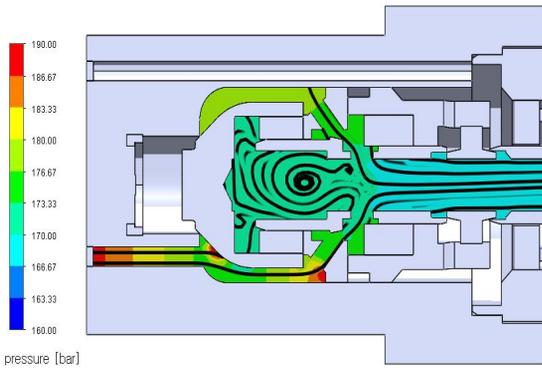


Fig. 4 Velocity distribution at the inlet and streamlines

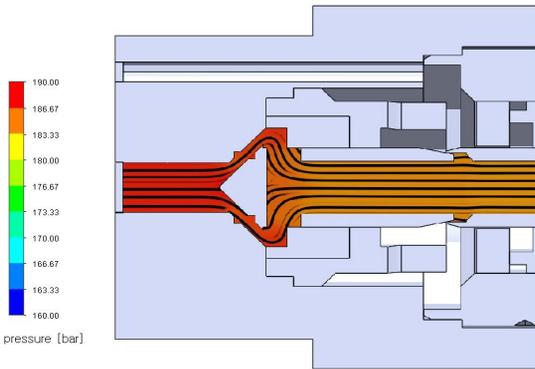


Fig. 5 Improved model of CNG charger

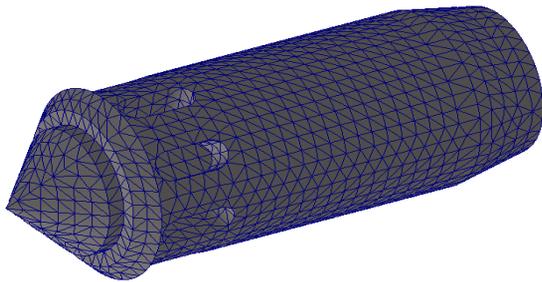


Fig. 6 Design parts mesh using Solidworks

식 (5)에 표시된 부차적 손실은 속도의 제곱에 비례하게 된다. Fig. 6은 Fig. 5의 설계를 하기 위하여 새로 설계한 부품이다. 와류가 발생하고 에너지손실이 발생하는 구간을 개선하고 부품을 간소화 하기 위해서 Fig. 6의 부품을 설계하여 유동해석에 적용하

였다. 유동에서 속도는 면적과 관련 있기 때문에 Fig. 6에서 새로 표현된 설계된 부품과 외벽 사이에 유체가 유동하는 간격이 중요하다. 간격에 따른 유동해석을 진행하여 새로운 부품에 대한 최적설계를 진행하고 새로운 부품이 있는 유입구는 충전기에서 가장 높은 속도와 압력으로 유체가 공급되기 때문에 이송되는 과정에서 속도와 압력에 의한 부품의 구조 해석을 진행하여 개선된 모델링의 안정성을 검증하였다.

3.2 유동해석 및 최적설계

충전기에서 190bar의 압력으로 차량 탱크에 연료를 주입할 때 그 이상의 압력을 요구하게 되면 압축기를 가동해야 한다. 상용 설계 검증프로그램인 SOLID WORKS의 Flow Simulation을 사용하여 충전기에서 190bar의 압력을 가할 때 차량탱크에 주입된 압력과 차량 탱크의 압력이 차량 탱크의 충전종료 압력인 190bar에 도달했을 때 충전기의 요구압력을 계산하였다. 또한 천연가스의 주된 성분이 메탄이므로 SOLID WORKS 프로그램 내 메탄가스 성질 정의를 적용하였다.

충전기의 열교환기로 21℃의 온도로 유지되고 있기 때문에 21℃의 등온과정으로 가정하였으며 경계 조건으로 충전기 부분인 유입구의 유속을 0.002051 m^3/s 로 고정하고 차량의 연료탱크인 출입구 부분의 압력을 변화시켜 유입구 부분의 요구압력이 190bar 일 때 충전 가능 압력을 확인하였다. Table 1은 충전기에서 190bar의 압력을 주었을 때 충전 가능한 압력을 표시했다.

Fig. 7에서 표현된 그림과 Table 1을 보면 알 수 있듯이 설계 부품과 외벽의 간격이 1.5mm일 때 차량탱크의 압력이 가장 높은 압력으로 충전 가능할 것을 볼 수 있다.

또한, 충전종료 시 충전기 요구압력을 확인하기 위해서 각 설계에 따라 유입구 유속 0.002051 m^3/s , 유출구 압력 190bar로 고정하여 계산하였다. Table 2는 충전종료 시 충전기의 요구압력을 나타내었다. Table 2에서 충전종료 압력에서 충전기에 요구되는 압력을 표로 나타내었다. Table 2와 Fig. 9를 보면 알 수 있듯이 유동간격이 1.5mm에서 가장 낮은 압력 수치를 확인할 수 있다.

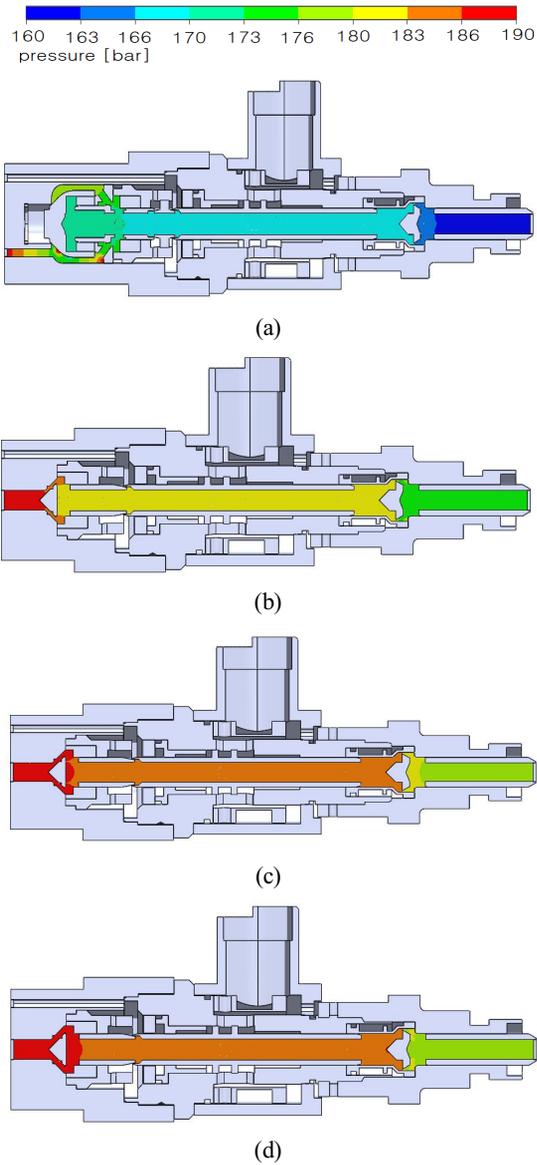


Fig. 7 Fillable pressure at 190bar injection

Table 1 Fillable pressure at 190bar injection

Interval	Tank Pressure	Charger Pressure
Before Revision	162.50 bar	190 bar
1.0 mm	174.24 bar	190 bar
1.5 mm	178.40 bar	190 bar
2.0 mm	177.71 bar	190 bar

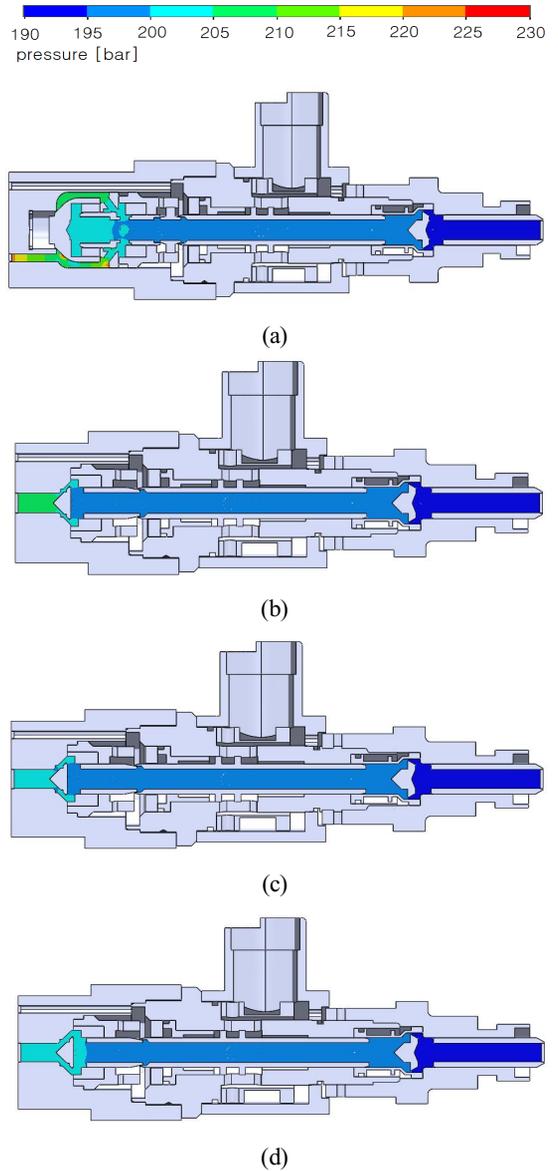


Fig. 9 Required pressure at the end of charging

Table 2 Required pressure at the end of filling

Interval	Tank Pressure	Charger Pressure
Before Revision	190 bar	226.73 bar
1.0 mm	190 bar	206.82 bar
1.5 mm	190 bar	202.71 bar
2.0 mm	190 bar	203.43 bar

3.3 구조해석 및 안전성 검증

천연가스 기기의 부품으로 흔히 많이 쓰는 스테인리스 봉강을 모델에 적용하여 구조해석을 진행하였다. SOLID WORKS의 Simulation을 이용하여 해석하였으며 Table 3은 SOLID WORKS Simulation에서 정의되어있는 AISI 3016 강화 스테인리스 봉강의 물성치를 표시한 것이다.

유동해석으로 진행했을 때 부품간 간격이 1.5mm인 설계에서 가장 높은 효율을 보였으므로 1.5mm 간격의 설계에서 충전종료 압력인 202.71bar를 적용하였다. Fig 10은 유입구의 유동을 바꿔 부차적 손실을 줄인 핵심 부품에 조립상 형상을 고려하여 고정 조건을 준 뒤 202.71bar의 압력을 작용시켜 계산한 결과값을 볼 수 있다. 그림에서 나타난 바와 같이 최대치는 $2.663e+07N/m^2$ 인 것을 알 수 있으며 설계에 적용된 재료의 항복응력인 $1.379e+08N/m^2$ 보다 작은 것을 알 수 있다.

Table 3 AISI 3016 properties

Properties	Metric
modulus of elasticity	$1.92999e+11 N/m^2$
Poisson's ratio	0.3
Density	$8000.000 kg/m^3$
Tensile strength	$550 N/mm^2$
Yield strength	$137.895 N/mm^2$

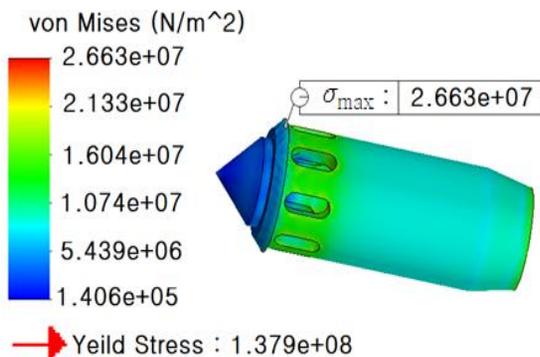


Fig. 10 Result of structural analysis of parts

Table 4 Compressor operation pressure range

Interval	Compressor on	Compressor off	Operation range
Before Revision	190 bar	226.73 bar	36.73
1.0 mm	190 bar	206.82 bar	16.82
1.5 mm	190 bar	202.71 bar	12.71
2.0 mm	190 bar	203.43 bar	13.43

3.4 CNG충전노즐 해석결과

CNG 충전노즐의 분해 및 해석결과 불필요한 형상에 의해 와류가 발생하는 것을 확인하였다. 이에 따라 에너지가 손실되어 충전에 실제 필요한 압력보다 많은 압력이 필요하다고 분석하였다. 와류발생지점을 제거하기 위해 부품의 간소화를 할 필요가 있었고 부품간소화를 위해 새로운 부품을 재설계하여 새로운 부품에 대한 해석을 진행하였으며 Table 4를 보면 그 결과값을 알 수 있다.

충전기 내부의 압축기는 충전 중 190bar의 압력 이상을 요구하게 되면 작동하므로 충전기가 190bar일 때 작동이 시작되고 차량 연료탱크의 압력이 190bar가 되면 작동을 중지하게 된다. Table 4는 충전기 내부의 압축기가 작동을 시작하고 멈추는 범위를 나타낸 표이며 작동범위가 적은 것을 효율이 높은 것으로 판단할 수 있다. 또한, 항복응력이 $1.379e+08N/m^2$ 이고 시뮬레이션의 최대 응력 값이 $2.663e+07N/m^2$ 인 것을 고려하여 안전계수를 구하면 5.178이 되므로 안전성을 판단할 수 있다.

재설계 이전의 기존제품의 경우에는 190bar의 압력 이상으로 36.73bar의 압력을 압축기를 가동하여 추가로 가해주어야 했다. 이번 연구를 통한 재설계 모델링 중 가장 효율이 좋은 유로의 간격이 1.5mm인 모델링과 비교하면 24.02bar가 차이 나므로 개선한 설계라 할 수 있으며 그에 대한 안정성도 안전계수를 통하여 검증하였다.

4. 결론

본 연구는 CNG 충전노즐의 최적설계를 통해 충전 요구압력을 줄임으로써 효율을 높인 설계를 제시하였다. CNG 충전소에서 주로 충전되는 시내버

스가 충전되는 과정을 가정하여 경계조건을 지정하였으며 유동해석과 구조해석을 통해 설계의 효율성과 안정성을 검증하였다.

- 1) 버스의 연료충전과정을 가정하여 기존의 CNG 충전노즐 내부의 유동해석을 진행하고 충전 과정에 필요한 압력을 확인할 수 있었다.
- 2) 유동해석으로 유동특성을 고려한 내부형상을 수정하여 유로의 간격별로 모델을 제시하였으며 각 모델에 대해 최적의 효율을 낼 수 있는 설계를 진행하여 효율성을 확인할 수 있다.
- 3) 유로의 간격이 1.5mm인 모델까지 충전 완료 요구압력이 낮아지는 것을 확인할 수 있고 그 이후부터 다시 높은 압력을 요구하는 것을 확인할 수 있었다.
- 4) 유로의 간격이 1.5mm인 모델의 경우 작용하는 최대 압력을 고려하여 설계된 부품에 대한 구조해석을 진행하였고 구조해석결과 안전계수가 5.178으로 작동에 무리가 없는 것을 확인했다.
- 5) 구조해석을 통하여 새로 제안한 설계에 안전성을 검증하고 유동해석을 통하여 충전과정에서 효율성을 검증하였다.

후 기

본 논문은 과학기술정보통신부 선도연구센터 기초연구사업 (과제번호: NRF-2019R1A5A8083201)과 산학연 Collabo R&D 사업화R&D(2단계) 사업 (과제번호 : S3096431), 2022년도 정부(산업통상자원부)의 재원으로 한국에너지기술평가원의 지원(202140 00000520, 자원순환(재제조)산업 고도화 인력양성) 지원에 의해 연구되었으며 이에 감사드립니다.

REFERENCES

1. Kang, S. K., Huh, Y. S., "A Study on the Quantitative Risk Assessment of Hydrogen-CNG Complex Refueling Station," Journal of the Korean Institute of Gas, Vol. 24, No. 1, pp. 41-48, 2020.
2. Jang, K. S., Hong, M. S., "Safety Evaluations for Defects in CNG Pressure Vessels," Journal of the Korean Society of Manufacturing Technology

Engineers, Vol. 27, No. 5, pp. 430-438, 2018.

3. Lim, O. T., "Study on Performance and Emission Characteristics of CNG/Diesel Dual-Fuel Engine," The Korean Society of Mechanical Engineers, Vol. 35, No. 9, pp. 869-874, 2011.
4. Kim, C. K., Yoo, J. W., "Finite Element Analysis on the Sealing Contact Stress of a CNG Fueling Nipple for Vehicles," Journal of the Korean Institute of Gas Vol. 16, No. 6, pp. 67-72, 2012.
5. Yoo, G. H., Kim, J. L., Lee, T. S., Lee, J. H., "Study of the Characteristics of Hydrogen-Gas Filling Process of Ultra-Light Composite Tanks for Fuel-Cell Vehicles," The Korean Society of Mechanical Engineers, A, Vol. 35, No. 7, pp. 813-817, 2011.
6. Kim, N. Y., Wu, Y. T., Qin, Z., Cho, Y. M., Lyu, S. K., "A Study on the Optimal Design According to the Piston Shape of the 3/8" Hydraulic Quick Coupler," Journal of the Korean Society of Manufacturing Process Engineers, Vol. 20, No 2, pp. 66-71, 2021.