



LPG 충전장치의 강도안전성에 관한 연구

†김청균

홍익대학교 트리보·메카·에너지기술 연구센터
(2017년 11월 24일 접수, 2018년 4월 11일 수정, 2018년 4월 12일 채택)

A Study on the Strength Safety of LPG Fuelling Nozzle

†Chung Kyun Kim

Research Center for Tribology, Mechatronics and Energy Technology
Hongik University, Seoul 121-791, Korea
(Received November 24, 2017; Revised April 11, 2018; Accepted April 12, 2018)

요약

본 연구에서는 볼밸브와 긴 실린더 튜브로 구성된 LPG 충전장치의 강도안전성에 대한 FEM 해석결과를 제시하고 있다. LPG 충전장치의 강도안전성 해석을 위해 1.7~3.5mm의 벽면 두께를 갖는 볼밸브와 긴 실린더 튜브에 0.5~3.5MPa의 가스압력을 공급하였다. 1.7mm 벽면 두께를 갖는 볼밸브에 3.5MPa의 가스압력을 공급하였을 때 발생한 von Mises 최대응력은 25.4MPa이고, 이 값은 황동소재 항복강도의 25.9%에 해당한다. 그리고 1.7mm 벽면 두께를 갖는 긴 실린더 튜브에 3.5MPa의 가스압력을 공급하였을 때 발생한 von Mises 최대응력은 23.7MPa이고, 이 값은 동일한 조건으로 해석한 볼밸브에 비해 6.7%나 더 안전한 것으로 나타났다. 긴 실린더 튜브의 벽면 두께를 2.0mm로 증가시켰을 경우 발생한 von Mises 최대응력 20.2MPa은 1.7mm의 벽면 두께를 갖는 같은 실린더 튜브에 비해 14.8%나 더 안전하였다. 따라서 본 연구에서는 볼밸브와 실린더 튜브의 강도안전성을 확보하기 위해서는 벽면의 두께를 1.7~2.0mm 정도로 최적화된 LPG 충전장치가 바람직하다.

Abstract - This paper presents the FEM analysis results on the strength safety of LPG fuelling nozzle, which is composed of ball valve and long cylinder tube. For the strength safety analysis of LPG fuelling Nozzle, the gas pressure of 0.5~3.5MPa has been supplied to the ball valve and long cylinder tube bodies with the wall thickness of 1.7~3.5mm. The maximum von Mises stress of the ball valve with 1.7mm wall thickness is 25.4MPa for the supply gas pressure of 3.5MPa, which is 25.9% compared with that of the yield stress of the brass. And the maximum von Mises stress was 23.7MPa when a 3.5MPa gas pressure was applied to a long cylinder tube with a wall thickness of 1.7mm, which was 6.7% more safe than the ball valve which was analyzed under the same conditions. For the increased wall thickness, 2.0mm of the long cylinder tube, the maximum von Mises stress of 20.2MPa is 14.8% more safe compared with that of 1.7mm wall thickness of the same cylinder tube. Thus, the wall thickness of the ball valve and cylinder tube is recommended as an optimized thickness of 1.7~2.0mm for the strength safety of the LPG fuelling nozzle.

Key words : LPG Fuelling Nozzle, ball valve, cylinder tube, strength safety, FEM

1. 서 론

액화석유가스(LPG) 자동차에 가스연료를 공급하

기 위해서는 디스펜서(dispenser)에 연결한 퀵 커플러 타입의 LPG 충전장치가 필요하다. LPG 충전장치는 0.7~0.8MPa의 압력으로 공급된 가스연료를 차단하고 있다가 LPG 자동차의 연료탱크에 부착된 충전니플에 체결되는 순간 자동으로 유출하는 구조이다.

†Corresponding author:ckkim_hongik@naver.com
Copyright © 2018 by The Korean Institute of Gas

LPG 충전장치는 가스연료의 공급을 개폐하기 위한 볼밸브와 충전과정에 가스의 외부누출을 차단하고 충전니플에 체결하기 위한 실린더 튜브를 연결하여 사용한다.

최근 급격하게 증가한 미세먼지와 질소산화물이 일상생활에 큰 영향을 미치면서 청전연료에 대한 관심이 높아졌다. 2013년에 세계보건기구가 1급 발암물질로 지정한 질소산화물 배출량(2013년도 환경부 통계자료)을 보면[1], 경유차는 26%, 중장비와 농기계, 선박 등에 사용되는 디젤엔진은 23%, 공장은 16%, 석탄발전소 등에서는 16%, 기타 자동차에서는 5% 정도 방출하는 것으로 나타났다. 그중에서 청정연료를 사용하는 LPG 자동차와 CNG 차량은 가장 낮은 오염물질을 방출하는 것으로 알려져 가스차량에 대한 관심은 높으나 보급률은 대단히 낮다.

LP가스 연료를 자동차에 0.7~0.8MPa의 압력으로 공급하기 위해서는 LPG 충전장치 구조물의 강도를 충분히 확보하고 있어야 충전에 따른 안전을 담보할 수 있다. 따라서 LPG 충전장치의 강도는 KGS AA212 안전기준[2]에 의거 내압검사 기준인 2.9MPa의 압력으로 시험하였을 때 이상팽창이나 가스누출이 없어야 안전한 것으로 간주한다.

현재 사용하고 있는 LPG 충전장치는 일본에서 개발한 퀵 커플러 타입을 한국표준으로 제정하였으나, 이에 대한 직접적인 안전성 연구는 없었다. 다만, LPG나 CNG 충전장치에서 발생하는 가스누출을 차단하기 위한 밀봉기술에 대한 연구[3,4]가 있다.

LPG 자동차 충전소에서 사용하는 퀵 커플러 타입의 충전장치는 자동차 연료탱크에 부착된 충전니플과 체결하는 과정에 작업자가 실수하면 실린더 튜브 부분을 잡은 손에 상처가 발생하는 경우가 많아 본 연구에서는 실린더 튜브를 길게 설계한 해석 모델에 대해 강도안전성을 해석하였다. 또한, 추운 겨울에는 실수로 충전장치를 콘크리트 바닥면에 떨어뜨리면 LPG 충전장치가 손상을 받아 드물게는 가스가 누출되는 문제가 발생하기도 한다.

따라서 본 연구에서는 기존의 퀵 커플러 타입의 짧은 실린더 튜브 대신에 길게 설계한 실린더 튜브와 볼밸브 구조물에 대한 강도안전성을 유한요소법으로 해석하고자 한다.

II. 해석모델 및 해석조건

2-1 해석모델

Fig. 1에서는 LPG 충전장치의 강도안전성을 FEM으로 해석하기 위해 사용한 볼밸브와 기다란 실린더 튜브를 조립한 구조물을 보여주고 있다.

디스펜서에 연결된 고압호스를 통해 공급된 LPG는 충전장치의 볼밸브에 의해 차단된 상태로 체류하다가 연료탱크에 장착된 충전니플에 퀵 커플러 타입의 실린더 튜브가 체결되는 순간 볼밸브를 열어주면 고압의 LP가스는 연료탱크로 유출되어 저장된다.

Fig. 2(a)에서는 고압호스에 나사로 체결하기 위한 볼밸브 몸체를 보여주고, Fig. 2(b)는 볼밸브에 체결되는 기다란 실린더 튜브로 좌측 끝단부에 조립된 다수개의 볼이 충전니플의 끝단부에 형성된 반원형의 홈과 맞물려 체결하기 위한 구조를 보여주고 있다.

따라서 LPG 충전장치를 구성하는 Fig. 2(a)의 볼밸브 몸체와 Fig. 2(b)의 기다란 실린더 튜브 몸체는 모두 디스펜서로부터 공급되는 고압의 가스압력을 충분히 견딜 수 있도록 강도안전성을 확보해야 충전을 보장할 수 있다.

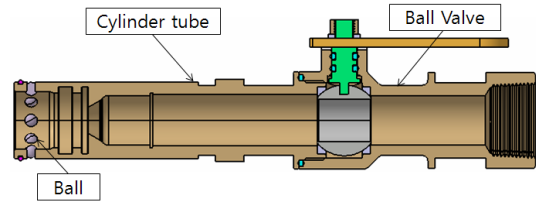
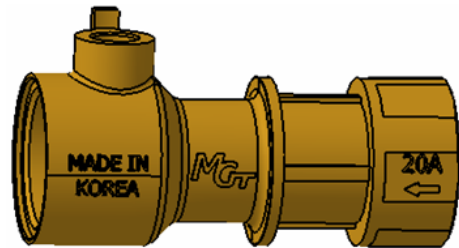
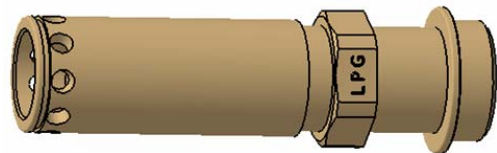


Fig. 1. Cross sectional area of ball valve and long cylinder tube assembly.



(a) Ball valve body



(b) Cylinder tube body

Fig. 2. Ball valve and long cylinder tube for LPG fuelling nozzle.

Table 1. Mechanical properties of brass, C3771

Properties	Values
Elastic modulus, MPa	110
Yield strength, MPa	98.1
Tensile strength, MPa	145
Poisson's ratio	0.35

2-2 해석조건

Fig. 2와 같은 설계모델에 대한 강도안전성을 해석하기 위해 볼밸브와 기다란 실린더 튜브의 벽면 두께를 1.7~3.5mm로 변화시켜가면서 응력강도 안전성을 FEM으로 해석하였다.

이때 볼밸브와 실린더 튜브에 작용하는 가스내압은 LPG 충전장치의 강도안전 검사기준인 KGS AA212[2]를 준용하였다. 이 기준에 따르면 LPG 충전장치에는 최대 가스압력 2.9MPa를 공급하여 안전성 여부를 점검하기 때문에 본 연구에서는 최대 3.5MPa의 가스압력을 공급한 상태에서 구조물의 강도안전성에 대한 FEM 해석을 수행하였다.

볼밸브와 실린더 튜브의 소재는 KS D 5101[5]에 기술한 황동이고, 황동소재의 기계적 특성은 Table 1에서 제시한다.

III. 해석결과 및 고찰

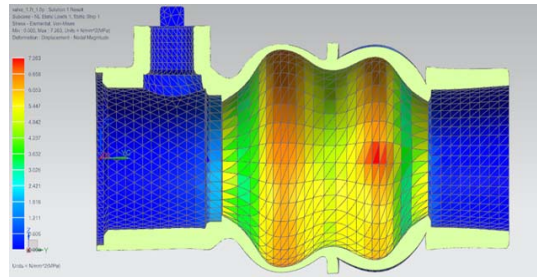
LPG 충전장치의 차단기능을 담당하는 볼밸브에 1.0MPa와 3.5MPa의 가스압력을 공급하였을 때 볼밸브 몸체에서 발생한 응력분포도를 Figs. 3과 4에서 보여주고 있다.

Fig. 3은 볼밸브에 가스압력 1.0MPa를 공급하였을 때 FEM으로 해석한 강도안전성 결과이다. 여기서 고려한 가스압력 1.0MPa는 LP가스를 공급하는 디스펜서의 실제 충전압력이 0.7~0.8MPa인 점을 감안한 것이다.

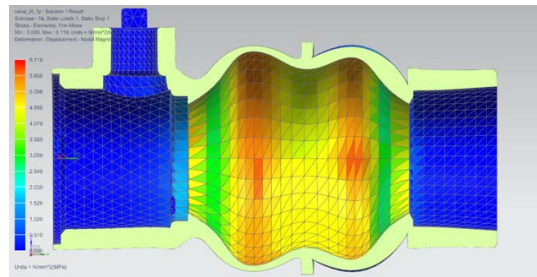
Fig. 3(a)에서는 볼밸브의 벽면 두께가 1.7mm일 때, 볼밸브의 우측에 위치한 튜브에서 발생한 von Mises 최대응력이 7.3MPa인 것으로 해석되었다. 이것은 황동소재의 항복강도 대비 7.4% 정도로 충분히 안전한 결과이다.

또한, Fig. 3(b)에서는 볼밸브의 두께를 2.0mm로 더 두껍게 설계한 모델로, 볼밸브의 튜브에 형성된 von Mises 최대응력은 6.1MPa로 벽면의 두께가 증가한 만큼 강도안전성도 높아진 결과를 얻었다.

Fig. 4의 강도안전성 해석에서 볼밸브에 공급한

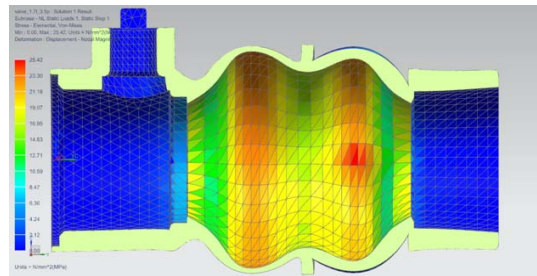


(a) For wall thickness 1.7mm and gas pressure 1.0MPa

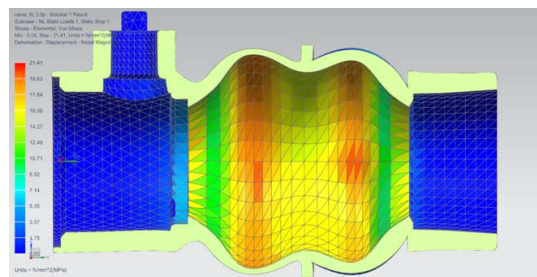


(b) For wall thickness 2.0mm and gas pressure 1.0MPa

Fig. 3. Stress distributions of ball valve bodies for the supplied gas pressure, 1.0MPa.



(a) For wall thickness 1.7mm and gas pressure 3.5MPa



(b) For wall thickness 2.0mm and gas pressure 3.5MPa

Fig. 4. Stress distributions of ball valve bodies for the supplied gas pressure, 3.5MPa.

가스압력을 3.5MPa로 높게 설정한 것은 LPG 충전 장치에 대한 강도안전 검사기준에서 제시한 검사내 압 2.9MPa를 감안한 것이다.

Fig. 4(a)에서는 볼밸브의 벽면 두께가 1.7mm일 때, 볼밸브의 튜브에 형성된 von Mises 최대응력은 25.4MPa로 황동소재의 항복강도 대비 25.9%로 충분히 안전한 해석결과를 제시하고 있다.

또한, Fig. 4(b)에서는 볼밸브의 두께를 2.0mm로 더 두껍게 설계한 모델에 대한 von Mises 최대응력 21.4MPa은 볼밸브의 튜브에서 발생하였다. 결국 볼밸브 몸체의 벽면 두께를 1.7~2.0mm로 설계하고, 공급된 가스압력을 최대 3.5MPa로 올려서 사용해도 충분히 안전한 것으로 해석되었다.

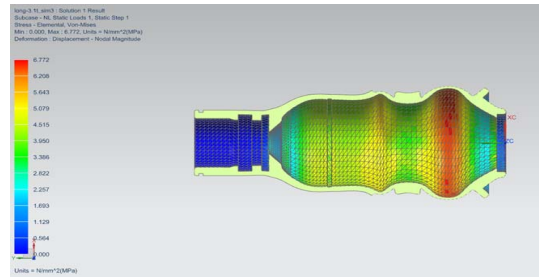
Figs. 5와 6에서는 LPG 충전장치의 선단부에 해당하는 실린더 튜브의 우측에는 볼밸브가 연결되고, 좌측에는 차량의 연료탱크에 장착된 충전니플과 체결되어 LP연료를 공급하는 구조이다. Fig. 2(b)에서 보여준 기다란 실린더 튜브에 가스압력 1.0MPa와 3.5MPa를 공급하였을 때 몸체에서 발생한 응력분포 해석결과를 Figs. 5와 6에서 각각 보여주고 있다.

Fig. 5의 FEM 해석결과는 긴 실린더 튜브에 가스압력 1.0MPa를 공급하였을 때 발생한 응력분포도이다. Fig. 5(a)에서는 실린더 튜브의 벽면 두께를 1.7mm로 설계하였을 때, 실린더 튜브의 우측 끝단부에서 발생한 von Mises 최대응력은 6.8MPa로 나타났다. 이 값은 황동소재의 항복강도에 비해 6.9% 정도에 해당하는 결과로 대단히 안전하다할 수 있다.

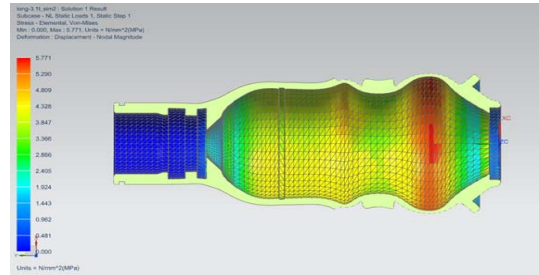
또한, Fig. 5(b)의 해석결과는 실린더 튜브의 두께를 2.0mm로 더 두껍게 설계하였을 때, 실린더 튜브의 우측 끝단부에서 형성된 von Mises 최대응력은 5.8MPa로 더 낮아졌다. 이것은 실린더 튜브의 벽면 두께를 높였기 때문에 형성된 강도증가로 충분히 안전해져 수치적으로는 과도한 설계로 간주될 수 있다.

Fig. 6은 실린더 튜브에 작용하는 가스압력을 3.5MPa로 크게 높여서 강도안전성을 해석한 결과를 보여주고 있다. Fig. 6(a)의 FEM 해석결과에서는 실린더 튜브의 벽면 두께를 1.7mm로 설계하였을 때, 튜브에 형성된 von Mises 최대응력이 23.7MPa로 계산되었고, 이 값은 볼밸브의 최대응력 25.4MPa보다 6.7%나 더 안전한 결과이다. 실린더 튜브에 형성된 Fig. 6(a)의 von Mises 최대응력 23.7MPa은 황동소재의 항복강도 대비 24.2%로 충분히 안전하다는 해석결과이다.

또한, Fig. 6(b)에서는 실린더 튜브의 두께를

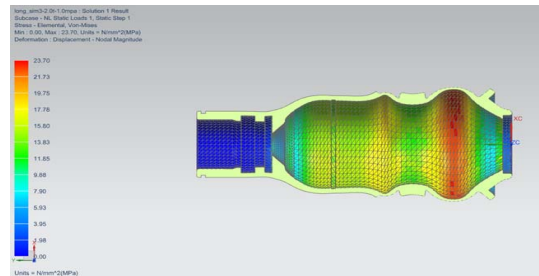


(a) For wall thickness 1.7mm and gas pressure 1.0MPa

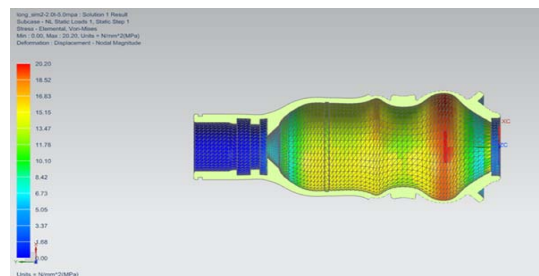


(b) For wall thickness 2.0mm and gas pressure 1.0MPa

Fig. 5. Stress distributions of long cylinder tube bodies for the supplied gas pressure, 1.0MPa.



(a) For wall thickness 1.7mm and gas pressure 3.5MPa



(b) For wall thickness 2.0mm and gas pressure 3.5MPa

Fig. 6. Stress distributions of long cylinder tube bodies for the supplied gas pressure, 3.5MPa.

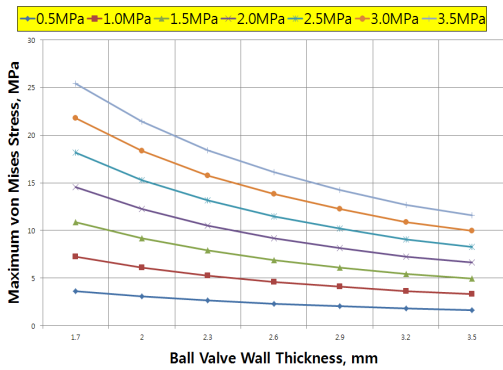


Fig. 7. Maximum von Mises stresses of ball valve bodies for supplied gas pressures.

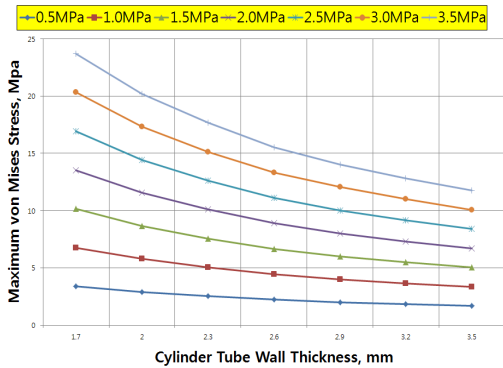


Fig. 8. Maximum von Mises stresses of long cylinder tube bodies for supplied gas pressures.

2.0mm로 설계할 경우, von Mises 최대응력은 20.2MPa로 실린더 튜브의 우측 끝단부에서 발생하였고, 이 값은 항복응력에 견주어 크게 안전한 결과라 할 수 있다.

Fig. 3~Fig. 6의 해석결과를 보면, 볼밸브와 실린더 튜브의 두께를 1.7mm로 설계하고, 가스압력을 강도안전 검사기준인 2.9MPa보다 높은 3.5MPa를 공급해도 황동소재의 항복강도 대비 24.2~25.9% 정도로 LPG 충전장치는 안전하게 설계된 것으로 평가될 수 있다.

Fig. 7에서는 볼밸브에 가스압력 0.5~3.5MPa를 공급하였을 때, 밸브의 몸체에 형성된 von Mises 최대응력을 보여준다. FEM 해석결과에 의하면, 가스압력을 높게 공급할수록 벽면의 두께를 두껍게

설계하는 것이 밸브 몸체에 작용하는 응력강도 안전성은 크게 향상되고 있음을 보여주고 있다. 그러나 볼밸브의 최소두께를 1.7mm로 설계하고, 가스압력을 3.5MPa 정도로 높게 공급해도 황동소재의 항복강도 이내에 있기 때문에 해석모델 모두가 안전한 설계조건에 해당된다. 또한, 볼밸브의 강도안전성 해석에서 가스를 충전하는 과정에 사용하는 공급압력을 1.0MPa일 경우는 볼밸브 벽면의 두께를 1.7~2.0mm로 설계해도 충분히 안전한 것으로 나타났다.

Fig. 8에서는 기다란 실린더 튜브에 공급한 가스압력이 0.5~3.5MPa일 때, 실린더 튜브의 몸체에 작용하는 von Mises 최대응력을 FEM으로 해석한 결과를 보여준 데이터이다. 실린더 튜브에 대한 Fig. 8의 강도안전성 해석결과는 Fig. 7에서 보여준 볼밸브의 응력강도와 유사한 경향을 보여주고 있으나, 실린더 튜브의 강도안전성은 더 우수해졌다는 결과를 제시하고 있다. 결국 동일한 조건에서 해석한 강도안전성 결과를 보면, Fig. 2에서 제시한 기다란 실린더 튜브 모델은 볼밸브에 비해 더 안전하다 할 수 있다.

IV. 결론

본 연구에서는 볼밸브와 실린더 튜브로 구성된 LPG 충전장치 구조물에 대한 강도안전성을 FEM으로 해석하였다.

볼밸브와 긴 실린더 튜브의 벽면 두께를 1.7~3.5mm까지 설계하고, LPG 충전장치의 사용압력과 검사단계의 최고압력 모두를 감안한 가스압력 0.5~3.5MPa를 설정하여 강도안전성을 해석하였다.

가장 얇은 1.7mm의 두께를 갖는 볼밸브에 3.5MPa의 높은 압력을 공급하였을 때 발생한 von Mises 최대응력은 25.4MPa로 계산되었으며, 이 값은 황동소재의 항복강도 대비 25.9%로 충분히 안전한 데이터이다.

또한, 길게 설계한 실린더 튜브의 두께를 1.7mm로 설계하고, 가스압력을 3.5MPa를 공급하였을 때 발생한 von Mises 최대응력은 23.7MPa로 동일한 조건의 볼밸브에 비해 6.7%나 더 안전한 해석결과를 얻었다. 실린더 튜브의 두께를 2.0mm로 더 두껍게 설계하면 최대응력은 20.2MPa로 14.8%나 줄어들어 충분히 안전한 것으로 나타났다.

따라서 본 연구에서 제시한 볼밸브와 실린더 튜브로 구성된 LPG 충전장치에서 벽면의 두께를 1.7~2.0mm 정도로 설계하면 강도안전성은 확보된 것으로 판단된다.

후 기

이 논문은 2017학년도 홍익대학교 학술연구진흥비에 의하여 지원되었습니다.

REFERENCES

- [1] Koohee Jung, "87.8 million cars. Why did we choose the diesel car?", SBS News, (May 13, 2016)
- [2] KGS AA212 Code, KGS, (2017)
- [3] D.H. Kim and C.K. Kim, "A Study on the Optimized Design of O-rings for LPG Filling Unit", J. of the KIGAS, 10(3), 34-40, (2006)
- [4] J.W Yoo and CK. kim, "A Study of O-ring Behaviour for CNG Fuelling Nozzle", Proceedings of the 2012 KIGAS Fall Conference, pp.140~143, (Nov. 2, 2012)
- [5] KS D 5101, (2015)