



증발가스 재액화 드럼의 단열구조에 관한 실험적 연구

김익수 · †정영준

㈜엔케이 기술연구소

(2020년 12월 21일 접수, 2021년 2월 2일 수정, 2021년 2월 3일 채택)

The Experimental Study of Insulation Structure for BOG Re-liquefaction Drum

Ik-Soo Kim · †Young-Jun Jung

NK CO., LTD., R&D CENTER, Busan 46743, Korea

(Received December 21, 2020; Revised February 2, 2021; Accepted February 3, 2021)

요 약

재액화 드럼은 과냉각된 LNG를 증발가스에 직접 분사하기 위해 상부에 스프레이 노즐을 설치하고, 기액 분리가 용이하도록 데미스터를 설치한 제품으로, 소형 재액화 설비의 재액화 효율을 높이기 위해 개발한 제품이다.

드럼의 상온 내압기밀시험에서는 설계압력의 1.5배 이상의 압력에서도 누설(Leak)이 없었으나, 단열성능시험 중 온도변화에 따른 수축/팽창으로 인해 볼트풀림 현상이 발생하였다. 제품의 지속적인 사용을 위해 플랜지 결합부의 단열 시공은 탈부착이 가능하도록 개발하였으며, 기존 단열과의 열침입량 비교 결과 드럼 내 유입 유량 대비 매우 미미함을 확인하였다.

Abstract - The re-liquefaction drum is a product that installed spray nozzles at the top to directly spray overcooled LNG into evaporative gas and installed demisters to facilitate gas separation, which was developed to increase the re-liquidity efficiency of small scale re-liquefaction facilities.

In the hydrostatic test of the drum, no leakage occurred even at a pressure of 1.5 times the design pressure, but during the BOR(Boil Off Rate) test, the bolt loosening occurred due to contraction and expansion by temperature change. For the continued use of the product, insulation construction on flange connections was developed to enable detachment and attachment, and the comparison of heat load with existing insulation confirmed that it was very small compared to the inlet flow rate in the drum.

Key words : re-liquefaction drum, bolt loosening, flange connection, insulation construction, heat load

1. 서 론

LNG(Liquefied Natural Gas, 액화천연가스)는 가정에서 흔히 사용하는 도시가스를 액화시킨 것으로 대기압(1atm) 기준, 같은 질량의 천연가스를 액화시킬

경우 부피가 약 1/600로 줄어들어 저장 및 운송 시에는 천연가스를 액화한 상태로 운용하는 것이 유리하다.

하지만 기체상태의 천연가스를 액화하기 위해서는 -163℃까지 온도를 낮춰줘야하며, 해당 온도는 일반적인 상온(20±5℃를 의미)과 약 190℃의 온도차가 있어 외부로부터의 열침입에 취약하여 LNG 저장탱크 내부에서 기화해 저장탱크 내부의 압력을 상승시켜 저장탱크의 안전성에 영향을 미친다.

†Corresponding author: yjjeong@nkcf.com

Copyright © 2021 by The Korean Institute of Gas

이에 한국가스안전공사에서는 KGS Code를 제정하여 저장탱크의 설계압력(Design Pressure)을 넘지 않도록 안전밸브(Pressure Relief Valve)를 설치하는 것을 의무화하고 있으며, 안전밸브의 세팅 압력(Maximum Allowable Relief Valve Setting, MARVS)에 도달할 경우 자동 방출되도록 설정되어 있다[1].

이처럼 증발된 천연가스가 자동 방출되어 대기에 노출될 경우 천연가스 조성비(Composition Rate)의 약 90%를 차지하는 메탄(Methane, CH₄)은 온실가스 지수가 이산화탄소(Carbon Dioxide, CO₂)보다 21배 높은 대기오염에 치명적인 물질이다.

이를 방지하기 위해 증발가스(Boil Off Gas, BOG)를 방출 전에 포집하여 재액화 한 후 저장설비로 돌려 보내는 시스템을 재액화 시스템(Re-liquefaction System)이라고 하며, 주로 천연가스보다 끓는 점이 낮은 질소(Nitrogen, N₂)를 냉매로 사용하여 시스템을 구성한다.

환경부의 재원을 지원받아 개발 중인 소형 재액화 시스템은 현재까지 개발된 재액화 시스템과 달리 증발가스와 냉매와의 열교환을 통해 액화시키지 않고 재액화 드럼(Re-liquefaction Drum)을 이용해 과냉각한 LNG를 증발가스에 직접 분사해 액화하는 방식을 적용한 제품을 개발해 시운전하고 있다.

이에 본 연구에서는 상기 재액화 시스템에 적용되는 핵심 기자재인 재액화 드럼에 대해 시험을 하며 얻은 결과와 이를 통해 얻은 극저온 플랜지 결합부 단열 시공 방법을 본지에 작성하였다.

II. 내압기밀시험

2.1. 재액화 드럼

재액화 드럼의 설계조건은 아래의 **Table 1**과 같으며, ASME Code Section VIII Division 1의 규정을 적용하여 설계를 수행하였고 이를 통해 도출된 드럼의 도면은 아래의 **Fig. 1**과 같다[2].

여기서 재액화 드럼은 일반적인 재액화 시스템에서 사용되는 BOG 콘덴서(Condenser)와 유사하나 BOG 콘덴서는 프리쿨러(Pre Cooler)를 거쳐 예비 냉각된 BOG 가스를 기체와 액체로 분리하는 역할이고 재액화 드럼은 상부에 과냉각된 LNG를 분사하기 위한 노즐(Nozzle)이 있고 하부에서 공급되는 증발가스와 재액화 효율을 올리기 위한 데미스터(Demister)가 설치되어 있는 것이 특징이다.

이에 드럼 내부에 설치된 노즐과 데미스터의 정기적 점검 및 보수(Maintenance)를 위해 동체를 열 수 있도록 플랜지(Flange)를 적용해 조립하였고 이는 **Fig. 1**을 통해 확인할 수 있다.

Table 1. Specification of re-liquefaction drum

Code	ASME Sec.VIII DIV.1 (2015)
Material	A240-316
Volume[m ³]	0.311
Design Pressure[bar.G]	7.0
Design Temperature[°C]	-196

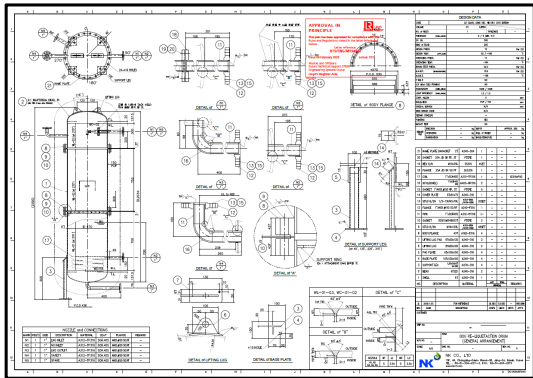


Fig. 1. Drawing of re-liquefaction drum.

Table 2. Condition of hydrostatic test

Type of Test	Hydrostatic
Design Pressure	7.0 bar.G
Test Pressure	11.0 bar.G
Holding Time	0.5 Hr(= 30 Min.)



Fig. 2. Hydrostatic test of re-liquefaction drum.

플랜지를 적용해 압력용기를 조립할 경우, 용접(Welding)을 적용한 압력용기보다 내부 유체가 쉘 수 있는 확률이 상대적으로 높고, 극저온 유체를 보관하는 압력용기의 경우 시공된 단열재를 훼손해야하는 단점이 있는 대신 내부 수리가 가능하고 검사구멍(Inspection Hole) 없이 제품을 제작할 수 있는 장점을 지니고 있다.

2.2. 내압기밀시험

재액화 드럼의 내압기밀시험은 ASME Code Section VIII Division 1 UG-99 ‘Standard Hydrostatic Test’을 기준으로 시험을 수행하였다.

시험 조건은 아래의 Table 2와 같으며, 가압유체는 물과 공기를 혼합(Hydrostatic)해 가압하였다.

해당 시험의 객관적 신뢰성을 확보하기 위해 3자 입회검사(Third Party Admission Inspection)를 진행하였으며, 3자 기관은 로이드 선급(Lloyd’s Register, LR)에서 입회해 시험을 수행하였다.

시험 결과, 자재 용접부 및 플랜지 결합부에서의 누설이 발생하지 않았으며, 제품 제작의 문제는 없는 것

으로 확인되었다.

III. 단열성능시험

3.1. 단열성능시험

재액화 드럼은 리턴(Return) 라인에 설치된 펌프(Pump)의 성능을 위해 재액화된 LNG를 바로 화물창으로 보내지 않고 일정 수위만큼 보관하고 드럼 내부에서 지정된 수위를 초과할 경우 펌프를 이용해 재액화된 LNG를 화물창으로 보낸다.

그러므로 드럼은 재액화된 극저온의 LNG를 지정 수위가 될 때까지 액화 상태로 보관할 수 있도록 단열재를 시공해 외부의 열침입을 일정 부분 차단해야 한다.

이를 위해 드럼에는 폴리우레탄폼(Poly-Urethane Foam, PUF)을 이용해 단열시공을 하였으며, 다른 단열 시공에 비해 제작이 간편하고 드럼의 외부로 연결된 배관이 많아 기 제작된 단열재를 시공하는데는 많은 비용과 시수 소모가 우려되어 폴리우레탄폼을 적용하였다.

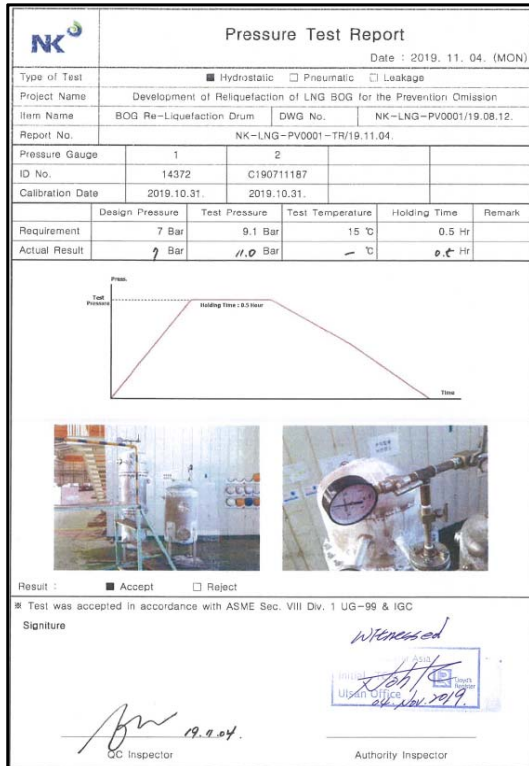


Fig. 3. Hydrostatic test report.

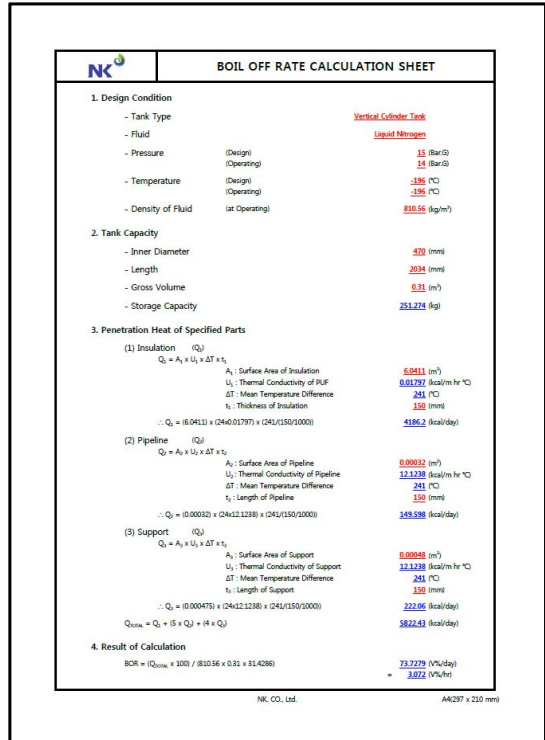
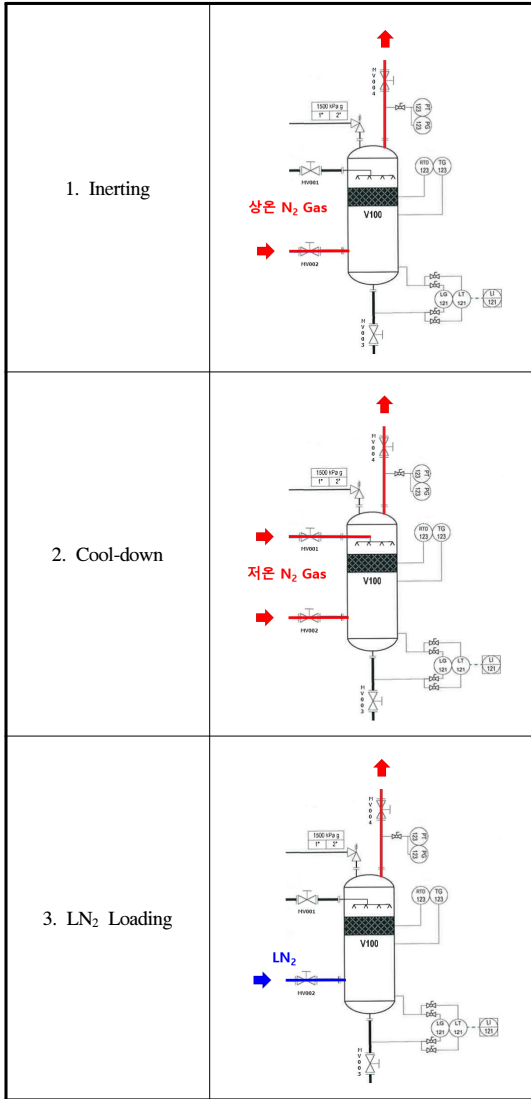


Fig. 4. BOR calculation sheet of re-liquefaction drum.

Table 3. Procedure of BOR test



그러나 폴리우레탄폼은 작업자의 시공속도 및 발포 방향에 따라 기계적 성능이 다를 수 있어[3], 최초 설계와 실험을 통해 비교해야 한다.

아래 Fig. 4는 설계에 사용된 계산 시트이며, 해당 자료와 비교할 실험은 LNG 및 액체 질소 저장용기의 단일성능시험인 BOR test와 동일하게 수행하였으며, Table 3을 통해 BOR test의 절차와 간단한 그림을 도식화하였다.

단일성능시험은 우선, LN₂ Loading 전 압력용기 내부를 불활성화하는 이너팅(Inerting) 작업을 수행

Table 4. BOR test criteria

Performance	Measurement	Criteria
Inerting	O ₂ Concentration	< 1.0%
Cool-down	Inside Temp.	< -140℃
LN ₂ Loading	Inside Temp.	< -190℃
	Weight	= 440kg



Fig. 5. BOR test of re-liquefaction drum.

한다.

이너팅은 상온의 질소를 용기 내부로 지속적으로 불어넣어 용기 내부에 잔존해 있는 산소 및 수분을 제거해 기체의 결빙으로 인한 제품 손상을 막기 위해 수행한다. 이너팅 작업은 산소측정기를 통해 용기 내부의 잔존 산소농도가 1% 이하가 됨을 확인한 후 질소 주입을 완료한다.

극저온의 액화가스인 질소를 상온의 압력용기에 주입하게 될 경우 액화질소의 온도가 갑자기 상승하며 기화가 일어나게 되고 갑작스런 부피의 팽창으로 인해 압력용기에 치명적 손상을 가져올 수 있다.

이에 용기와 액화가스 간의 온도차이를 단계적으로 줄이기 위해 질소 주입시 온도를 조절해 시간당 약 20℃만 낮출 수 있도록 질소를 주입한다. 용기 내부의 온도가 -140℃가 될 때까지 쿨다운 작업을 수행하고 이를 완료할 경우 액체상태의 질소를 주입한다(LN₂ Loading).

Table 4는 각 절차의 종료 기준인 Criteria를 나타내었다.

Fig. 5는 상기의 작업을 모두 완료한 상태의 사진이며, 주입 완료 후 용기 내부의 압력이 올라갈 때까지 지속적으로 용기 내부의 온도, 압력을 기록한다.

3.2. 볼트풀림 현상

액화질소 주입 완료 후 내부 기체가 자연 기화되면서 용기의 압력이 상승한다. 이렇게 상승한 압력이 용기에 설치된 안전밸브(Safety Valve)의 세팅압력(Maximum Allowable Relief Valve Setting, MARVS)까지 상승할 경우 안전밸브가 작동하고 압력용기 내부의 압력은 기화된 질소가 방출되면서 낮아지게 된다.

본 시험에서는 최초 안전밸브가 작동하기 직전 갈라지는 소리와 함께 Fig. 6과 같은 현상이 일어나 시험 결과 값을 얻지 못하고 안전을 위해 시험을 종료하였다. 본 재액화 드럼의 단열재는 용기 전체를 150mm의 두께로 전부 뒤덮는 것으로 설계되어 재액화 드럼을 열어보기 위해서는 단열재를 제거해야만 용기를 열어 볼 수 있다.

용기 내부의 기화된 질소가 누설되어 배출 될 곳이 없어 누출부 주변의 단열재를 부풀어 오르게 한 것으로 추측하였다.

단열성능시험 전 설계압력의 1.5배 이상의 압력(11bar.G)을 주입하고도 누설이 발생하지 않았으나 본 시험에서는 약 (6bar.G)의 압력에서 누설이 발생하였다. 해당 원인을 분석하기 위해 시공된 단열재를 모두 제거하였으며(Fig. 7 참고) 용기의 동체 플랜지 부에 체결된 볼트가 대부분 1.5바퀴 이상 풀어진 상태임을 확인해 단열성능시험 중 볼트풀림 현상이 발생한 것으로 판단하였다.

볼트풀림 현상은 체결된 나사가 진동이나 충격, 운동, 하중 변화 등으로 인해 의도되지 않은 상태에서 나사가 풀리는 현상으로서 일반적으로 아래와 같은 조건에서 발생한다[4].

- ① 나사부의 길이가 짧아 접촉압력이 작을 경우
- ② 주변의 진동, 충격을 받아 순간접촉압력이 감소한 경우



Fig. 6. Inflated insulation of re-liquefaction drum.

- ③ 나사접합부에서 미끄럼이 반복되어 마멸이 발생한 경우
- ④ 온도변화에 따른 열변형으로 나사접합부의 접촉압력이 감소한 경우

그리고 진동 및 온도와 같은 환경조건에 의해 볼트축력이 변해 볼트 풀림 현상이 발생할 수 있음을 초음파 볼트 축력계를 활용해 확인한 연구논문도 확인할 수 있었다[5].

본 제품이 내압기밀시험에서는 누설이 없었다는 것을 생각해볼 때 단열성능시험과 내압기밀시험의 차이를 생각해보면 온도조건 외에는 오히려 내압기밀시험 때의 조건이 더욱 극한환경으로 볼 수 있어 상기 ④에 의한 볼트풀림 현상이 발생한 것으로 판단하였다.

그리고 볼트가 단열재에 싸여져 고정된 상태에서 볼트풀림 현상이 발생한 것에 대해서는 한국산업안전보건공단에서 발행한 ‘볼트, 너트의 선정 및 체결에 관한 기술지침’에서 되돌기 회전 없는 풀림에 대해 찾아 볼 수 있었으며, 해당 내용을 아래에 작성하였다[6].

7. 볼트, 너트의 풀림

7.1 되돌기 회전 없는 풀림

- (4) 주변의 온도변화로 인한 볼트의 팽창, 수축으로 나사이음이 풀리거나 또는 조여 질 수 있으며, 화재 등에 의해 볼트나 피체결 부재가 재료의 재결정온도 이상으로 가열되었을 때에는 조임력이 상실되어 풀림이 발생되므로 제조업 등의 조치가 필요하다.



Fig. 7. Removed insulation of re-liquefaction drum.

재액화 드럼은 지속적으로 일정 수위 이상의 극저온 유체가 저장되는 제품이 아니므로 용기의 플랜지 체결부는 온도변화가 발생할 것이며 이로 인해 볼트풀림 현상은 지속적으로 발생할 수 있어 새로운 단열재 시공방법을 모색하였다.

IV. 단열 시공 방법

4.1. 단열 재시공

아래의 **Fig. 8**은 기존 단열 시공(좌측)과 새롭게 적용할 단열 시공 방법(우측)에 대해 도식화 한 것으로 빨간색 대각선은 발포형 폴리우레탄폼을 시공한 것이고 파란색 교차선은 플랜지 커버(Flange Cover)를 제작하고 커버 내부에 유동적 형태를 가질 수 있는 글라스울(Glass Wool) 단열재를 채워넣는 형태로 시공한 것을 나타낸다.

Table 5는 폴리우레탄 폼과 글라스울의 열전도 계수를 나타내고 있으며 해당 값을 통해 전도(Conduction)를 통한 열침입량을 계산하여 비교하였다.

열침입량의 차이를 비교한 결과, 글라스울을 적용한 단열을 통해 13kcal/hr 만큼의 열침입량이 상대적으로 더 유입되는 것을 계산하였으며 이는 26kg

Table 5. Thermal conductivity of insulation

	Thermal Conductivity [W/mK]
Polyurethane Foam[40k]	0.022
Glass Wool [48k]	0.033

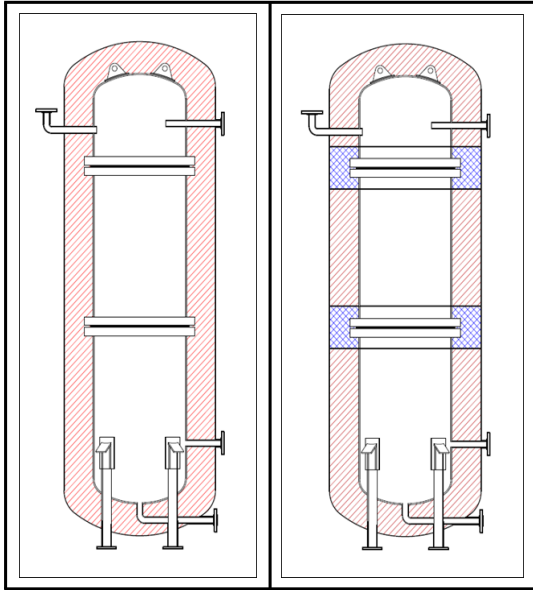


Fig. 8. Existing insulation(left), alteration insulation(right).

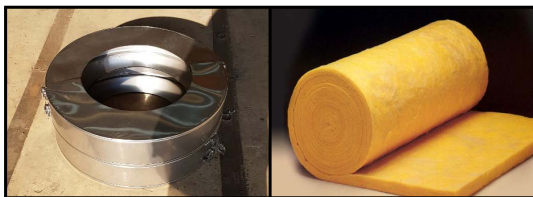


Fig. 9. Flange cover(left), Glass wool(right).

의 천연가스(Brunei 産, 기준)를 1시간 동안 1℃ 상승시킬 수 있는 열량으로 재액화 드럼으로 유입되는 LNG 및 천연가스의 유량(시간당 약 700kg)을 고려했을 때 매우 미미한 열량으로 기존 단열 대비 큰 차이가 없을 것으로 판단하였다.



Fig. 10. Re-liquefaction drum after insulation construction change

V. 결론

소형 재액화 시스템에 적용될 재액화 드럼에 대해 제작 및 시운전하며 얻은 결과를 통해 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

[1] 상온(15°C) 내압기밀시험에서는 11bar.G의 압력조건에서도 누설이 없던 드럼이 극저온(-196°C)의 환경에서는 약 5.8bar.G의 압력조건에서 누설이 발생함.

[2] 확인 결과, 볼트풀림 현상이 발생하였으며 온도 변화로 인한 열변형이 원인. 이에 지속적인 사용을 위해 플랜지 결합부에서의 단열 시공 방법을 모색하였고 플랜지 커버를 활용하고 내부에 글라스울과 같은 유동적 충전재를 채우는 방법을 고안함.

[3] 새로운 시공방법은 기존의 단열시공 방법에 비해 단열성능이 뛰어나거나, 볼트풀림현상을 예방하는 역할은 아니지만 플랜지를 적용한 압력용기의 정기적 검사 또는 수리를 목적으로

[4] 시공 방법에 따른 열침입량을 계산한 결과 신규

시공법을 적용할 경우 기존 시공법보다 열침입량이 약 13kcal/hr 더 많은 것으로 나타났고, 이는 26kg의 천연가스를 1시간동안 1°C 올릴 수 있는 열량으로 재액화 드럼으로 유입되는 LNG와 증발가스 유량과 비교했을 경우 매우 미미함.

감사의 글

본 연구는 환경부의 재원으로 한국환경산업기술원의 “Non CO₂ 온실가스저감기술개발사업(20170024 10009)”의 지원으로 수행된 과제임.

REFERENCES

- [1] Korea Gas Safety Corporation, “Facility/Technical/Inspection/Supervision/Safety Assessment Code for Production of High-pressure Gases”, *Korea Gas Safety Code*, FP112, (2021)
- [2] American Society of Mechanical Engineers, “Rules for Construction of Pressure Vessels”, *Boiler and Pressure Vessel Code*, Sec. 8, Div. 1, (2017)
- [3] Tu, Z.H., Shim, V.P.W. & Lim, C.T., “Plastic Deformation Modes in Rigid Polyurethane Foam under Static Loading”, *International Journal of Solids and Structures*, 38, 9267-9279, (2001)
- [4] Kim, M.W., Shin, I.H. & Lee, K.S., “Integrity Assessment of Weld Repair of Bolt-Screw Assembly”, *Journal of Korea Pressure Vessel and Piping*, 11(1), 79-86, (2015)
- [5] Choi, D.Y., Choi, J.C. & Han, J.U., “A Study of Bolt Tightening Changing Factor according to Durability Degradation”, *Journal of Auto-Vehicle Safety Association*, 7(1), 20-26, (2015)
- [6] Korea Occupational Safety & Health Agency, “Technical Guidelines for Selecting and Tighting of Bolt Nuts”, *KOSHA GUIDE*, O-2-2016, (2016)