



LNG선박용 방폭기자재(FPES)의 구조형상에 따른 건전성 평가에 관한 연구

김성주^a, 김성재^{a*}, 정진욱^a

A Study on the Evaluation of Integrity by the Structural Shape of the Flame Proof Enclosure Structure (FPES) for LNG Ship

Sung-Ju Kim^a, Seong-Jae Kim^{a*}, Jin-Uk Jung^a^a Department of Mechanical Eng., Dong-A Graduate School, 37 Nos. 550, Nakdong-daero, Saha-gu, Busan 49315, Korea

ARTICLE INFO

Article history:

Received	13	May	2019
Revised	03	June	2019
Accepted	12	June	2019

Keywords:

LNG ship
Flame proof enclosure structure (FPES)
Stress concentration
Structural analysis

ABSTRACT

Recently, the LNG ship industry is also developing technology due to increased demand in shipbuilding. LNG is the cause of accidents due to the risk of explosion. Therefore, flame proof enclosure structure (FPES) was studied as a form for the purpose of integrating the design of gas supply devices and detecting gas leakage. We intend to model and complement products of advanced countries overseas. It was proposed to change the shape of an ellipse due to the risk of stress concentration in products of advanced companies. Through structural analysis, the proposed FPES internal pressure performance evaluation was verified and compared to products of advanced companies. The proposed FPES is believed to be able to withstand an internal pressure of about seven times that of advanced companies.

1. 서론

1.1 연구 배경

최근 해상 수송 분야에서는 연료비 절감을 통해 및 경제성을 높이기 위하여 대형화, 고출력화 되어 왔다. 그 결과 연소환경은 고온, 고압이 되어 유해 배기가스 배출량의 증가로 이어졌다. 이러한 문제가 대두됨에 따라 LNG (Liquefied Natural Gas)선박은 친환경 선박으로서 대기 오염 물질 저감, 해양 생물 피해 및 해양 환경 오염 방지가 가능하다. 그에 따라 해외 선진사들은 소형 선박을 중심으로 LNG연료 추진 선박 기술개발을 진행 중이며 북유럽을 중심으로 전 세계적으로 빠르게 보급이 진행 중이다. 이러한 이유에서 최근 LNG선박 사업은 조선업에서 2012년 이후 운임 최고 수준으로 오르며, LNG운반선 발주 추이가 증가하고 있다^[1-2].

그러나 LNG선박 사업은 혹독한 해양환경 아래에서 그 기능을 발휘하는 동시에 안전성이 동반되어야 하나 LNG선박은 폭발의 위험이 있으며, 외력에 의한 사고를 제외하고는 내부에서의 폭발 및 화염으로 인한 사고가 가장 많다^[3-4].

따라서 LNG연료 추진 선박은 지속적이고, 안정적으로 엔진에서 요구하는 압력으로 NG (Natural Gas)를 공급하며 비상시 NG공급을 차단할 수 있는 공급시스템을 요구한다. 보통 저압의 LNG공급을 요구하는 엔진의 경우, Fig. 1에서 보이듯이 가스공급 시스템과 엔진 사이에 Valve와 Pipe로 구성되어 있는 가스공급장치가 설치된다. 이러한 가스공급장치는 선박의 엔진실에 위치하게 되며, LNG엔진의 가스 연료를 공급하기 위한 핵심 기자재이다^[5].

이러한 기자재 및 엔진실에서 사고를 방지하기 위해 설치되는 장비는 안전성이 확보 되어야 하며 LNG연료 추진 선박의 핵심

* Corresponding author. Tel.: +82-51-200-7647

Fax: +82-51-200-7656

E-mail address: sjkim641@dau.ac.kr (Seong-Jae Kim).

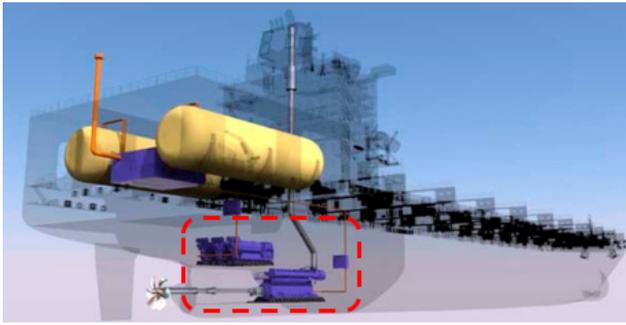


Fig. 1 FPES application location



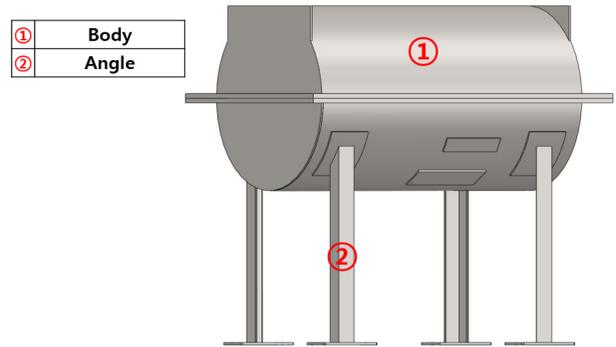
Fig. 2 Advanced company products

기자재인 가스 공급 장치에 안전장치 및 프로세스를 구축함으로써 안전성을 확보할 수 있다. 해외 선진사에서는 Fig. 2와 같은 방폭 구조물로서 다음과 같이 제작하여 사고를 방지하고 있다. 따라서 가스 공급 장치의 누설감지, 폭발 시 선박 기자재 개별 안전장치 보호 등의 목적으로 하나의 형태로 이루어진 내압 방폭 기자재인 FPES (Flame Proof Enclosure Structure) 개발을 목표로 함에 있다^[6-9].

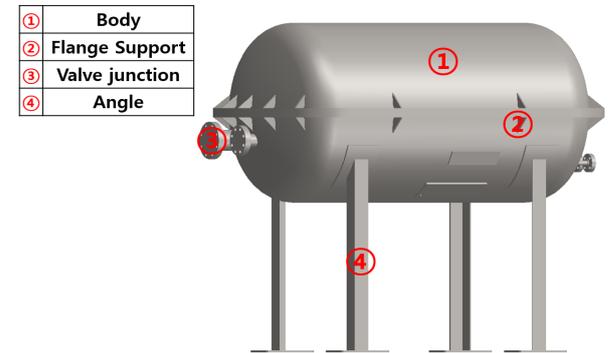
1.2 연구 목적

LNG는 항상 폭발의 위험성을 가지고 있기 때문에 관련 기자재에 다양한 안전장치들이 구비되어 있으며, 가스공급장치 역시 비상시 연료 공급을 차단하고 배출시키는 안전장치와 프로세스가 구비되어 있다. 그럼에도 불구하고 FPES의 용도는 가스공급장치 블록(Block)이나 Valve, Pipe Line에서 발생하는 누설에 대해 조치가 취해지기 전까지 누설가스를 외부로 누출발생을 막아주고 만약 누설 가스에 의하여 폭발이 일어날 경우 폭발압력 화염의 외부 유출을 방지해야 한다.

본 연구는 선박 엔진실의 가스공급장치 블록에서의 가스 누설로 인한 가스 폭발로부터 보호하고자하며, 선진사의 제품을 분석하고 개량하여 최적의 FPES를 개발하고자한다. 이러한 FPES의 성능 검증을 위해 다음과 같은 토대로 설계 및 평가를 진행하였다. 이때 설계기준은 설계, 검사, 설치의 표준 규격으로 널리 사용되는 ASME (American Society of Mechanical Engineers) Code 중



(a) TYPE A



(b) TYPE B

Fig. 3 FPES model

Section VIII Division 1의 압력용기 설계기준으로 기준하였으며, 평가 기준은 해양 플랜트 구조물 내충격 성능평가의 standard인 DNV-OS-C201에 제시된 평가기준을 토대로 FPES 구조물의 폭발 시 건전성평가를 실시하였다^[10-11].

2. 본 론

2.1 내압 방폭 기자재 모델링

Fig. 3의 (a)와 (b)는 본 연구의 대상인 FPES의 TYPE A와 TYPE B이다. TYPE A는 Fig. 2의 해외 선진사 방폭 구조물의 형태를 비슷하게 모델링 한 것으로서 TYPE B의 비교 대상이며, TYPE B는 TYPE A의 측면 모서리 부분을 개량화 하여 최적의 형태로 사료되는 타원 형태로 변경하여 구상하였다. 모델링은 상용 소프트웨어인 SOLIDWORKS로 수행하였다. 각 파트별 두께는 10 mm로 설계되어 있다.

2.2 해석 조건

FPES TYPE A와 TYPE B의 내압 성능 평가를 위하여 상용 소프트웨어인 ANSYS v18.1로 구조해석을 수행하였다^[12].

해석에 적용된 재료는 TYPE A와 TYPE B가 동일하게 SS275로 물성은 Table 1과 같다. 해석 조건으로는 두 가지

Table 1 Material property

Applied Part (Material)	Density (kg/m ³)	Modulus of elasticity (MPa)	Poisson's ratio	Yield strength (MPa)
FPES (SS275)	7,850	200,000	0.30	275

Table 2 Boundary condition

CASE	Pressure (MPa)	Angle Bottom	Thickness (mm)
#1	1	Fixed Support	10
#2	0.9		
#3	0.8		
#4	0.7		

Table 3 Nodes & Elements of TYPE A

TYPE	Mesh size (mm)	Mesh type	Nodes	Elements
A	20	Tetra & Hexa	445,229	232,399
B	20	Tetra & Hexa	648,848	359,257

TYPE 동일하게 Angle 바닥면에 Fixed Support 접촉조건을 부여하고, 내압은 Table 2의 Pressure와 같이 1 MPa~0.7 MPa인 4 가지 CASE로 부여하였다. Angle 바닥면의 볼트결합 부와 Valve 연결부의 크기가 작아 mesh size는 20 mm로 설정하였으며, 이에 따른 TYPE A와 TYPE B의 Nodes와 Elements 수는 Table 3에 나타내었다.

TYPE A와 TYPE B는 동일하게 내압 성능 검토를 진행하며, 내압 성능 검토를 위한 내압 부하 방식은 폭발할 시점인 0.02 초의 결과를 확인하고 폭발 이후에 나타나는 현상을 확인하기 위해 2 초의 결과를 확인하는 방식으로 Fig. 4에 나타내었다. 해석은 2 초까지 수행하며, A지점인 0.02 초일 때의 최대 등가 응력으로 구조물의 최대 폭발압력에서의 안전성을 확인하고자 한다. 구조물에 적용되는 재료 특성이 선형특성을 가지고 있으므로 압력이 완전히 사라지는 0.04 초 이후 B지점인 2 초에서 발생하는 최대 등가 응력 및 최대 변형을 확인 하여, 구조물이 소성변형을 일으키는 수준인지 검토하였다.

결과 검토를 위해 해양 플랫폼 구조물 내충격 성능평가의 standard인 DNV-OS-C201에 제시된 평가기준을 이용한다. 이 기준에서 도출된 최대 등가 응력은 재료 항복강도의 60% 이하를 보여야 하므로 FPES의 재료인 SS275의 항복강도 275 MPa의 60%의 수치인 165 MPa를 내압 해석의 허용응력으로 정의하였다.

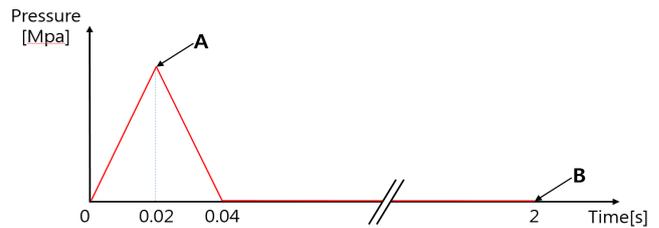


Fig. 4 Internal pressure over time

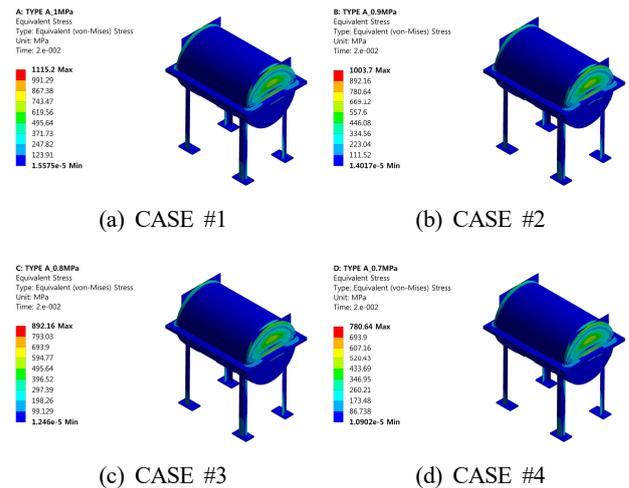


Fig. 5 Equivalent Stress of TYPE A (at 0.02s)

3. 결 과

3.1 허용응력과 안전율을 기준한 구조물 안전성 검토(TYPE A)

평가를 위하여 최대 등가응력, 안전율, 최대 변형을 산출하였다. Fig. 5는 TYPE A를 평가기준을 통한 0.02 초에서의 내압 크기에 따른 최대 등가응력 해석 결과를 나타내고 있다. 설계 시 예측한 듯이 측면과 원형 부가 만나는 부분의 모서리에서 응력 집중현상이 발생 하였다. 4가지 CASE에서 전체적으로 최대 등가응력이 허용응력인 165 MPa를 최소 615 MPa를 초과함을 보이고 안전율은 0.21로 보안을 하지 않은 현재의 상태인 FPES는 본래의 목적인 안전하게 방폭작용을 수행하는 데에 어려움이 있을 것으로 사료된다.

Fig. 6은 4가지 CASE에서의 최대 변형되는 부위와 경향 등은 큰 차이 없이 유사함을 보여 대표적으로 가장 취약할 것으로 보이는 내압이 가장 큰 1 MPa에서의 변형을 나타낸 것이며, (a)는 내압 부하 방식에서의 폭발시의 변형을 나타낸 것이고 (b)는 폭발 후 압력이 제거된 상태의 변형을 나타낸 것이다. (a)에서는 최대 18.746 mm의 변형을 보였고, (b)에서는 3.034×10^{-5} mm의 변형을 보였다. 폭발 후 압력이 제거된 상태의 변형은 매우 작아 0에 수렴하는 값으로 산출되어 초기 상태와 유사 할 것으로 사료된다.

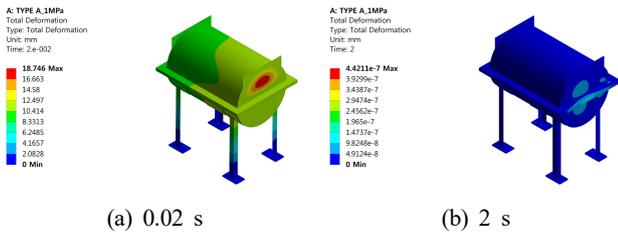


Fig. 6 Total Deformation of TYPE A

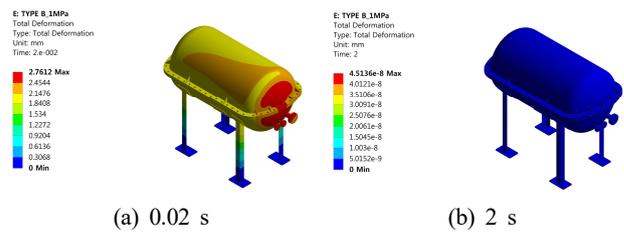


Fig. 8 Total Deformation of TYPE B

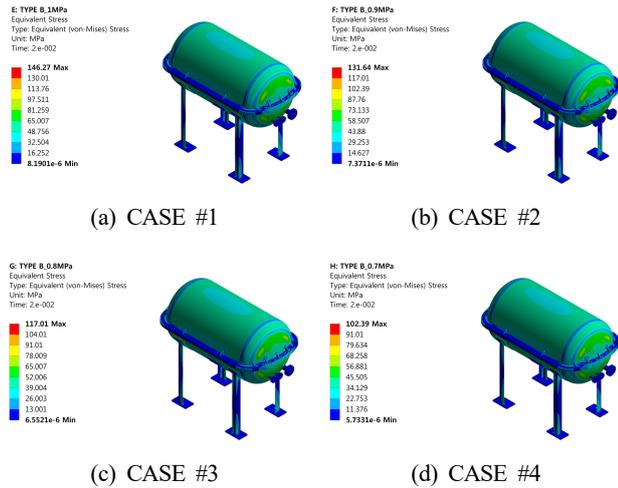


Fig. 7 Equilant Stress of TYPE B (at 0.02s)

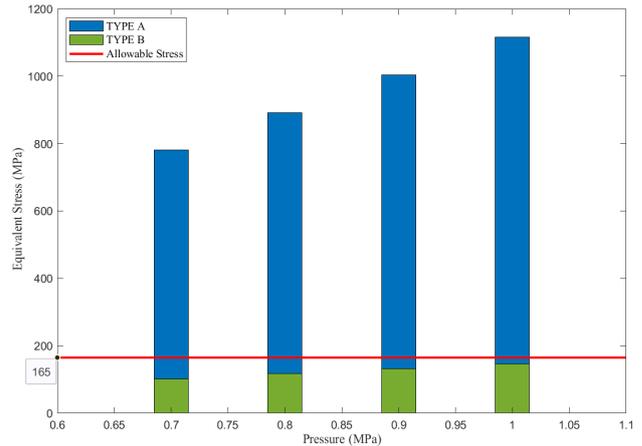


Fig. 9 Max. Equivalent Stress/Pressure of all TYPE (at 0.02 s)

3.2 허용응력과 안전율을 기준한 구조물 안전성 검토(TYPE B)

평가를 위하여 최대 등가응력, 안전율, 최대 변형을 산출하였다. Fig. 7은 TYPE B를 평가기준을 통한 0.02 초에서의 내압 크기에 따른 최대 등가응력 해석 결과를 나타내고 있다. 설계시 예측한대로 타원 형태로 설계를 하여 측면과 원형부가 만나는 지점에서 응력 집중현상이 발생하지 않았다. 4 가지 CASE에서 전체적으로 양호한 것으로 나타나고 가장 취약한 1 MPa에서의 최대 등가응력은 146.27 MPa이 나타나고 이에 따른 안전율은 1.13으로 FPES의 본 목적인 LNG 누수 방지 및 방폭작용에 이상이 없을 것으로 사료된다.

Fig. 8은 4 가지 CASE에서의 최대 변형되는 부위와 경향 등은 큰 차이 없이 유사함을 보여 대표적으로 가장 취약할 것으로 보이는 내압이 가장 큰 1 MPa에서의 변형을 나타낸 것이며, (a)는 내압 부하 방식에서의 폭발시의 변형을 나타낸 것이고 (b)는 폭발 후 압력이 제거된 상태의 변형을 나타낸 것이다. (a)에서는 최대 2.76 mm의 변형을 보였고, (b)에서는 5.84×10^{-6} mm의 변형을 보였다. 폭발 후 압력이 제거된 상태의 변형은 매우 작아 0에 수렴하는 값으로 산출되어 초기 상태와 유사하며 건전할 것으로 사료된다.

Table 4 Compare all TYPE

	TYPE A (flat)	TYPE B (round)	Remark
Max. Equivalent Stress (MPa)	1115.2	146.27	about 7.62 times
Max. Total Deformation at 0.02 s (mm)	18.746	2.76	about 6.79 times
Max. Total Deformation at 2 s (mm)	3.034×10^{-5}	5.84×10^{-6}	
Safety Factor at CASE #1	0.15	1.13	about 7.5 times

3.3 건전성 평가 수행

Fig. 9와 Table 4는 Fig. 5과 Fig. 7에서의 결과와 허용응력과의 관계를 도시하였으며 허용응력을 초과하지 않으며 최대 등가응력이 가장 높은 TYPE B의 CASE #1에서의 결과 값은 146.27 MPa이며, 허용응력 대비 안전계수는 약 1.13이다.

TYPE A와 TYPE B의 각 CASE 별 최대 등가응력을 비교하였을 시 TYPE A에서의 최대 등가응력이 TYPE B보다 각각 약 7.62배 높은 것으로 산출되었다.

허용응력을 만족하는 TYPE A에서의 폭발 시 내압을 산출하였다. 이때 폭발 시 내압은 0.14 MPa일 때 최대 등가응력은 156.13 MPa로 산출되었으며, 허용응력을 만족하는 수준이다.

1 MPa의 내압이 작용하는 TYPE B와 비슷한 성능을 보일 것으로 사료된다.

4. 결 론

본 연구에서는 구조물의 폭발 시 안전성을 확인하고 폭발 후의 안정성을 연구하고자하여 ANSYS v18.1로 구조해석을 진행하였다. 시간과 내압의 크기에 따른 폭발 시 및 폭발 후의 최대등가응력과 변형을 산출하였다.

폭발 시 TYPE A와 TYPE B에서 CASE #1 ~ CASE #4로 갈수록 최대 등가응력이 낮아지는 것을 알 수 있었다. TYPE A에서는 최대 등가응력은 4 가지 CASE에서 모두 허용응력을 초과하였으나, TYPE B는 최대 등가응력이 가장 높은 CASE #1에서 146.27 MPa로 허용응력을 초과하지 않았다.

폭발 시 TYPE A와 TYPE B에서 CASE #1 ~ CASE #4로 갈수록 최대 변형이 낮아지는 것을 알 수 있었다. TYPE A의 최대 변형은 18.746 mm로 전체 크기의 1.1% 정도의 변형을 보였고, TYPE B는 2.76 mm로 전체 크기의 0.12% 정도의 변형을 보였다.

폭발 후 TYPE A와 TYPE B에서 변형이 가장 큰 부분은 TYPE A의 CASE #1 으로 3.034×10^{-5} mm의 변형을 보였으나 값이 매우 작아 0에 수렴하는 값으로 산출되어 초기 상태와 유사할 것으로 사료된다.

허용응력을 만족하는 TYPE A에서의 폭발 시 내압을 산출하였을 때 내압이 0.14 MPa일 때 최대 등가응력은 156.13 MPa로 산출되었고 허용응력을 만족하는 수준이다. 1 MPa의 내압이 작용하는 TYPE B는 0.14 MPa의 내압이 작용하는 TYPE A 보다 약 7.14배 정도 높은 압력을 견딜 수 있으며 견전할 것으로 사료된다.

본 연구의 결과를 통하여 측면 부를 타원 형태로 설계하면 응력 집중현상을 해소하고 안전성을 더욱 높일 수 있음을 확인하였고, 이후 경량화 및 제작비용 측면에서 FPES의 두께를 줄이는 등 최적화로 확장 연구도 필요할 것으로 예상된다.

후 기

이 연구는 2019년도 정부(산업통상자원부)의 재원으로 한국산업기술진흥원의 지원을 받아 수행된 연구임(P0002092, 2019년 산업전문인력역량강화사업).

References

- [1] Stefana, E., Marciano, F., Alberti, M., 2015, Qualitative Risk Assessment of a Dual Fuel (LNG-Diesel) System for Heavy-duty Truck, Journal of Loss Prevention in the Process Industries, 39 39-58, <https://doi.org/10.1016/j.jlp.2015.11.007>.
- [2] Kim, H. S., 2012, Technical Trends and Analysis of LNG Fuelled Ship, Proc. Korea Marine Eng. Association Autumn Conf., 223-228.
- [3] Hanssen, A. G., Enstock, L., Langseth, M., 2002, Close-Range Blast Loading of Aluminium Foam Panels, Impact Engineering, Altair Engineering Inc., 27:6 593-618, [https://doi.org/10.1016/s0734-743x\(01\)00155-5](https://doi.org/10.1016/s0734-743x(01)00155-5).
- [4] Mullin, M. J., O'Toole, B. J., 2004, Simulation of Energy Absorbing Materials in Blast Loaded Structures, 8th International LS-DYNA Conference, Int. J. Non-Linear Mech., 8 67-81.
- [5] GenSys, n.d., viewed 27 April 2019, <<https://www.gensysgroup.com/products/modularized-systems/marine-systems.html>>.
- [6] Marine and Shipbuilding for Monthly, 2012, viewed 27 April 2019, <<http://www.shipbuilding.or.kr/Press/201212/DSME1205/DSME1205.html>>.
- [7] Kim. S. G., 2005, The Introduction of MAN B&W M/E and ME - GI Engine for LNG Carrier, Journal of the Korean Society of Marine Engineering, 29:6 603-611.
- [8] Nam. J. G., Kim. J. W., 2005, The Introduction of Wärtsilä DF50 Engine for LNG Carrier, Journal of the Korean Society of Marine Engineering, 29:6 612-617.
- [9] Kim. C. K., Kim., D. H., 2012, A Safety Study om the Stress Characteristics a Composite Pressure Cylinder for a Use of 70 MPa Hydrogen Gas Vehicle, Journal of the Korean Society of Manufacturing Technology Engineers, 21:1 1-6, <https://doi.org/10.7735/ksmte.2012.21.1.001>.
- [10] Cho. J. R., Kwon. J. W., Kim. C. S., Bae. C. H., Kim. H. J., 2010, Structural Analysis of Combined Vaporizer for LNG, Proc. Korea Marine Eng. Association, Spring Conf., 303-304.
- [11] DNV, 2011, STRUCTURAL DESIGN OF OFFSHORE UNIT (WSD METHOD), DNV-OS-C201, Det Norske Veritas, Norway.
- [12] ANSYS, 2017, ANSYS User's Guide Version 18.1, ANSYS Inc.