



## ANSYS Explicit Dynamics 해석을 활용한 차량용 LNG 용기의 충돌안전성 평가

남수현 · 김지유 · †김의수

한국교통대학교 안전공학과 학생연구원, 한국교통대학교 안전공학과 석사과정,  
한국교통대학교 안전공학과 교수  
(2022년 7월 29일 접수, 2022년 8월 24일 수정, 2022년 8월 25일 채택)

## Crash Safety Evaluation of LNG Fuel Containers for Vehicles using ANSYS Explicit Dynamics

SuHyun Nam · JiYu Kim · †EuiSoo Kim

Department of Safety Engineering, Korea National University of Transportation  
(Received July 29, 2022; Revised August 24, 2022; Accepted August 25, 2022)

### 요약

세계적으로 미세먼지로 인한 환경문제가 대두되면서 경유보다 저렴하고 공해가 적은 LNG가 자동차의 차세대 에너지로서 주목받아 보급이 확대되고 있는 추세이다. 그러나 국내에는 LNG 충전소 인프라가 많이 부족할 뿐더러 규제에 따라 장착할 수 있는 용기의 크기가 제한적이다 보니 원활한 운영을 하기 어려운 실정이다. 국내에선 천연가스 자동차의 원활한 운영을 위한 용기의 내용적 확장 연구와 개발이 진행 중이나 차체 밖으로 용기가 누출되어 차량충돌에 의한 충격을 용기가 직접적으로 받아 폭발하여 대형참사로 이루어질 수 있는 문제점이 있다. 이에 본 연구에선 LNG 용기의 안전성 평가를 ANSYS Explicit Dynamics 해석을 통해 변형량과 응력값을 도출함으로써 용기의 안전성을 검증하였다. 그 결과 용기에서 최대 565.37MPa의 최대응력이 발생하였고 용기의 재료로 사용된 STS304의 항복응력인 505MPa를 넘어선 것으로 보아 소성변형이 발생할 것으로 예상된다. 차량과 용기간의 충돌에 의한 충격이 가해질 경우 용기의 파손 또는 결함이 우려되므로 지지대나 보강설계가 필요하다고 사료된다.

**Abstract** - With the emergence of environmental problems caused by fine dust worldwide, LNG, which is cheaper and less pollution than diesel, is attracting attention as the next generation energy of automobiles and is expanding its supply. However, it is difficult to operate smoothly due to the lack of infrastructure for LNG charging stations in Korea and the limited size of containers that can be installed according to regulations. In Korea, research and development on the contents of containers for the smooth operation of natural gas vehicles are underway, but there is a problem that the container directly receives the impact of the vehicle collision and explodes, causing a major disaster. Therefore, in this study, the safety of the container was verified by deriving the strain and stress values through ANSYS Explicit Dynamics analysis. As a result, a maximum stress of 565.37MPa occurred in the container, and it is expected that plastic deformation will occur as it exceeds the yield stress of STS304 used as a material for the container, which is beyond 505MPa. When an impact caused by a collision between a vehicle and a container is applied, it is considered necessary to design a support or reinforcement because the container may be damaged or defective.

**Key words** : LNG fuel container, LNG fuel vehicle , vehicle collision analysis, crash-worthiness

†Corresponding author: es92kim@ut.ac.kr

Copyright © 2022 by The Korean Institute of Gas

## I. 서론

지구온난화, 미세먼지에 의한 환경 및 대기 오염 문제가 세계적으로 대두되면서 대체 에너지에 대한 관심 또한 증가하고 있는 추세이다. 하지만 석유를 대체할 수 있는 에너지는 많지 않으며 경유보다 저렴하고 공해가 적은 천연가스가 대체 연료로 주목받고 있다. 천연가스 자동차는 압축천연가스(CNG), 액화천연가스(LNG)를 연료로 주로 사용하며, 주행거리 측면에서 CNG의 경우 1회 충전 시 약 237 km 운행가능한 반면, LNG는 약 388 km로 상용차 연료로는 LNG가 적합하다. 또한 저장압력 측면에서 20 MPa인 CNG에 비해 LNG는 1.6 MPa로 더 낮은 압력에서 저장 가능하기 때문에 안전하다는 장점이 있어 LNG 연료에 대한 관심 및 수요가 증가하고 있다. 그러나 국내의 경우 LNG 연료용기 설치기준에 따른 용량 제한과 충전인프라 부족 등으로 LNG 자동차 보급 확대와 장거리 운행 면에서 어려움을 겪고 있다. 반면, 국외의 경우 차체 외측면 이격거리 없이 대용량의 용기를 장착하여 운행하고 있어 주행거리가 국내 대비 1.8배 이상 주행할 수 있다. 이에 따라 국내에서도 용기 내용적 확장에 대한 연구가 진행되고 있으나 용기가 차체 밖으로 노출되어 차량 충돌 시 직접적인 충격에 의해 누출공이 발생하여 화재(Fire), 폭발(Explosion)에 의한 대형참사를 야기할 수 있는 문제점을 지니고 있다. 1976년 이후부터 지금까지 발생한 NGV 용기 누출 및 파열 사고 조사 자료를 분석한 결과 총 43건 중 충돌사고로 인한 물리적 손상이 4건이나 발생하였다. 이와 같은 문제점을 예방하고 용기보급의 안정화와 개발을 위해서는 용기의 직접적인 충격에 대한 충돌 안전성 평가는 일반적으로 현장 실증시험을 수행하고 있는데 이 경우 많은 시간 및 비용이 소요될 뿐더러 다양한

하중조건을 부여하기에는 어려움이 있다. 충돌이나 충격에 관한 선행연구를 살펴보면 CNG 압력용기의 충돌안전성 평가나 유연 콘크리트 매트릭스의 충돌 거동평가를 ANSYS Explicit Dynamics를 활용한 해석 등 다양한 유한요소 프로그램이나 실증시험을 통해 복합재 구조물에 관한 많은 연구가 이루어지고 있다 [1-3]. 그러나 차량용 LNG 연료용기의 경우 주로 단일 성능이나 진동해석에 대한 연구는 진행되고 있지만 충격 또는 충돌안전성에 관한 연구는 미비한 실정이다 [4-5].

이에 본 연구에서는 차량용 LNG 연료용기의 충돌 안전성을 평가하기 위해 국내 ‘자동차 및 자동차 부품의 성능과 기준에 관한 규칙’에 준하여 충돌과 같은 순간적으로 발생하는 동적거동에 대한 비선형 해석에 적합한 ANSYS Explicit Dynamics 해석을 통해 등가 응력과 변형량을 도출하고 실증시험 안전기준과 비교 분석함으로써 향후 LNG 용기 개발에 기여하고 예방대책을 강구하고자 한다.

## II. LNG 용기의 구조

### 2.1 LNG 연료용기의 공급 시스템

연료공급시스템의 주 구성품은 충전구, 릴리프밸브, 단열용기, 연료게이지, 올라지 탱크, 환기구 라인, 기화기, 레귤레이터 등이 있다. 현재 개발된 LNG 충

Table 1. Comparison of LNG charging systems

Sortation	Single Line	Dual Line
① System Pressure	High	Low
② Fuel Temperature	High	Low
③ The Preheating Device	Necessity	Not Necessity
④ Fuel Density	Low	High
⑤ Saving Period	Short 0.36Kg/liter(-116°C)	Long 0.41Kg/liter(-151°C)
⑥ Fuel Supply Pressure	High	Low
⑦ Utilization Rate Compared to the Volume of the Container	Low	High
⑧ Supply Sufficient Fuel for Engine Speed	Advantage	Disadvantage

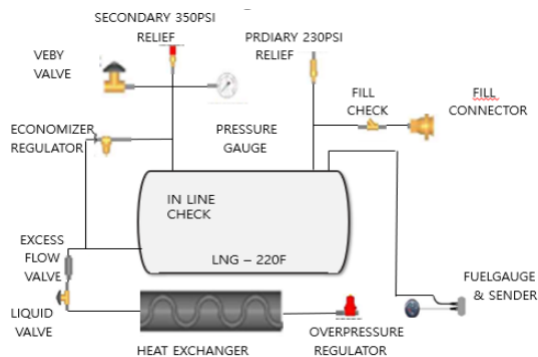


Fig. 1. The supply system of LNG containers.

전시스템은 크게 두 가지 방식이 있다. LNG를 주입하는 호스라인이 하나만 있는 싱글라인 방식과 주입하는 호스라인과 탱크안의 B.O.G(Boil of Gas)를 추출하는 호스라인이 있는 듀얼라인 방식을 Table 1. 에 비교하였다.

### 2.2 LNG 용기의 구조

국내에서 보편적으로 사용하는 차량용 LNG 연료 용기의 크기는 외경이 660 mm이고 길이는 내용적에 따라 1395 ~ 1920 mm이며 내용적은 300~450 L 이다. LNG자동차 용기의 구조에 대한 기준은 국토교통부 고시 자동차용 내압용기 안전에 관한 규정 별표2의 2.3항을 따라 횡형 이중 진공단열구조를 가진다. 현 규정에서는 용기의 재료는 -162°C 이하에서 액체 상태로 저장되어야 하기 때문에 단열성능이 뛰어나고 내구성이 좋은 STS304, STS340L, STS316 및 STS316L 만 사용하도록 규제되어 있다[6]. 용기의 치수는 내용적(L)에 대한 외조의 표면적(m<sup>2</sup>) 비율을 0.016 이하로 하며 용기 동체의 치수 허용오차는 용기 동체의 축에 수직인 동일단면에 있는 최대외경과 최소외경과의 차가 평균치를 1%를 초과하지 아니한 것으로 한다. 용기 동판, 접시형 경판, 반타원체형 경판의 두께는 각각의 부분에 대하여 정한 계산식에 따른 두께 이상으로 하며 두께 값에 대한 계산식은 아래와 같다.

$$t = PD / (2Sn - 1.2P) \tag{1}$$

$$t = PDW / (2Sn - 0.2P) \tag{2}$$

$$t = PDV / (2Sn - 0.2P) \tag{3}$$

$t$  : Thickness(mm)

$P$  : Maximum filling pressure(MPa)

$D$  : Body inner diameter (mm)

$W$  : Coefficient according to the shape of the plate-shaped head plate

$V$  : Coefficient according to the shape of the semi-ellipsoidal head plate

$S$  : It is the allowable capacity of the material (N/mm<sup>2</sup>) and is 1/3.5 of the tensile strength

$n$  : Welding efficiency of the longitudinal welding part of the body or the welding part of the center part of the head plate

LNG용기의 내부 구조는 가스의 용량이 상용의 온도에서 용기 내용적의 90%를 넘어 충전되지 않도록 과충전방지장치 또는 적절한 감량공간을 가지도록

설계하여야 한다.

### III. 유한요소 해석개요

차량용 LNG용기의 충돌안전성을 평가하기 위해 ANSYS Explicit Dynamics 해석을 활용하였다. 용기에 가해지는 직접적인 충격량을 측정하고 용기의 등가응력을 도출하고 충돌 후 변형량 양상을 분석하는데에 중점을 두었다. 프로그램에서의 절점의 가속도 계산(Explicit Solver)은 식 (4), (5), (6)에 나타난 중앙차분법(Leapfrog Method)를 사용하여 계산하였다.  $\dot{x}_i^{n-1/2}$ 에서 가속도가 결정되면 속도는 식 (5)와 같이 계산된다. 최종적으로, 변위는 속도를 적분하여 식(6)과 같이 계산된다.

$$\ddot{x}_i = \frac{F_i}{m} + b_i \tag{4}$$

$\ddot{x}_i$  : Nodal acceleration (i = 1,2,3)

$F_i$  : Force acting on the node

$b_i$  : Volumetric acceleration

$m$  : Mass of the node

$$\dot{x}_i^{n+1/2} = \dot{x}_i^{n-1/2} + \ddot{x}_i^n \Delta t^n \tag{5}$$

$$x_i^{n+1} = x_i^n + \dot{x}_i^{n+1/2} \Delta t^{n+1/2} \tag{6}$$

실제 차량용 LNG 연료용기를 취급하고 있는 회사의 용기 설계도를 기반으로 Fig. 2에 나타난 것과 같이 외조와 내조를 가지는 이중층 구조를 모델링 하였으며 용기의 외경은 660 mm, 내조의 길이는 1765 mm, 외조의 길이는 2256 mm로 설계하였으며 LNG용기의 기본적인 충격특성 자료를 파악하는 데에 중점을 두어 용기 HEAD 부분의 모델링은 제외하였다. 외조와 내조의 쓰인 동판의 두께는 외조 3 mm, 내조 3 mm로 모델링 하였으며 재료의 소성변형량 한계를 넘어서면 파괴되도록 설정하였다. 해석에 사용될 LNG 용기의 유한요소의 설정은 Fig. 3. 에 나타난 유한요소모델은 8절점 3차원 4 각 요소를 사용하였고 절점(Nodes)들과 요소(Elements)들의 개수는 각각 25359 및 75335 이며, 차량용 LNG 연료용기의 복합체를 표현하기 위해 쉘 요소로 3차원 형상에 적용하였다[7]. LNG 연료 용기의 재료는 내구성이 우수하고 단열성능이 뛰어난 STS304를 사용하였으며, 물성치를 프로그램 내 재료 설정 요소(Engineering Data)에 입력하였고 이에

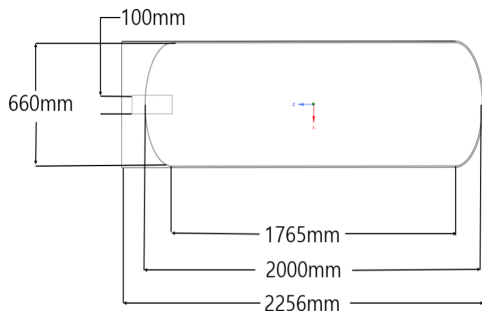


Fig. 2. Element model of LNG fuel container

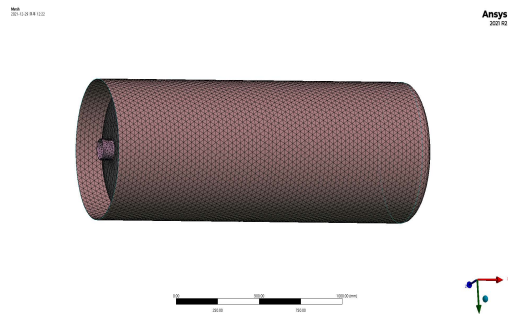


Fig. 3. The Design drawing of the LNG container

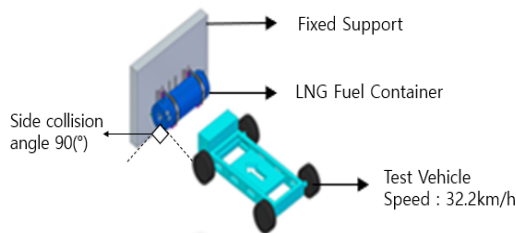


Fig. 4. The pressure-resistant container collision test method.

한 물성치 값은 Table 2.와 같다. 밀도와 탄성계수는 상온(20°C)에서의 값을 나타내었다. 재료는 비선형 해석을 나타내기 위해 재료에 이중선형 등방성 경화 (Bilinear Isotropic Hardening) 조건을 추가로 설정하였다[8-9]. 차량충돌로 인해 용기에 미치는 영향 또는 안전성을 검증하기 위해 적용한 해석조건 Table 3.에 나타난 국내의 시험기준을 준용하기로 하였다. 차체와 이격거리 없이 장착을 가정하기 위해 양쪽 모서리

Table 2. The material properties of STS 304.

Property	Value	Unit
Density(20°C)	7900	kg/m <sup>3</sup>
Poisson's Ratio	0.290	-
Young's Modulus	1.32E-5	GPa
Shear Modulus	82	GPa
Elastic Modulus(E) (20°C)	193~200	GPa
Tensile Strength	505	MPa
Yield Strength	215	MPa
Tangent Modulus	1E+10	Pa

Table 3. Safety standards for vehicle collision tests in the United States and Korea.

Nation	Korea
Regulations related to exams	Article 91 of the Automobile Rules
Collision direction	Front, Side, Back
Side collision angle(°)	90
Side collision speed(km/h)	32.2
Safety standards	The pressure drop at the high pressure portion of the fuel device shall not exceed the high value of 1,062 kPa or 895 X (T/V fs) for 60 minutes from the moment the vehicle stops.

끝을 고정(Fixed Support)하였고 모델의 충격부 반대편은 강체벽으로 모델링하여 탱크가 강체벽에 접촉(Contact)할수 있도록 모델링하였다. 충격체의 속도(Velocity)는 32.2 km/h 를 8,999 mm/s로 단위환산 후 부여하고 실증시험과 유사한 조건으로 충격해석을 수행하였다.

#### IV. 해석 결과 및 고찰

용기가 충돌안전성을 지니려면 안전기준과 같이 연료장치의 고압 부분에서의 압력 강하는 차량이 정지하는 순간 1,062 kPa 또는 60분 동안 895 X (T/V fs) 보다 높은 값을 초과하지 않아야 하나 충돌해석으로는

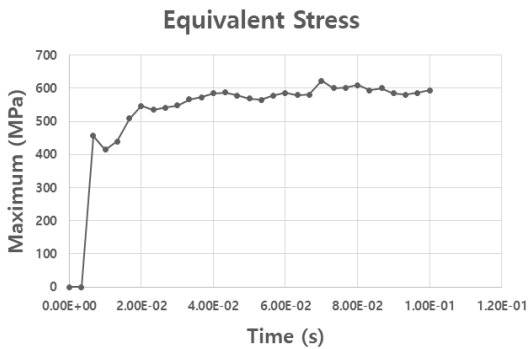


Fig. 5. Analysis graph(Equivalent stress)

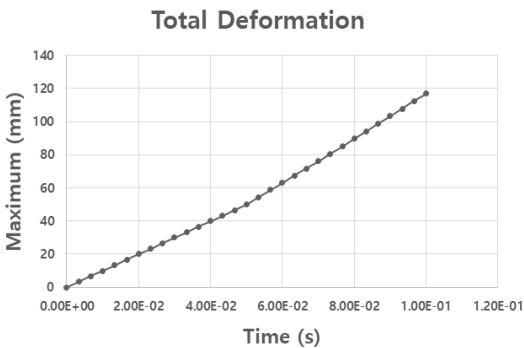


Fig. 6. Analysis graph(Total Deformation)

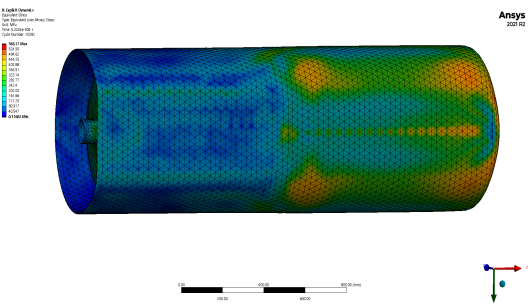


Fig. 7. Analysis result(Equivalent Stress)

용기의 내압강하를 도출해내어 안전기준과 비교 분석할 수 없기에 충돌 후 0.1초 동안의 용기의 변형량, 등가응력의 변화를 도출하여 용기의 파손부와 최대 변형량이 일어나는 부분에 대하여 검토하였다. 해석 결과는 Fig. 5., Fig. 6. 에 시간에 따른 최대 응력값과 변형량을 각각 그래프로 나타냈으며 Fig. 7., Fig. 8.,

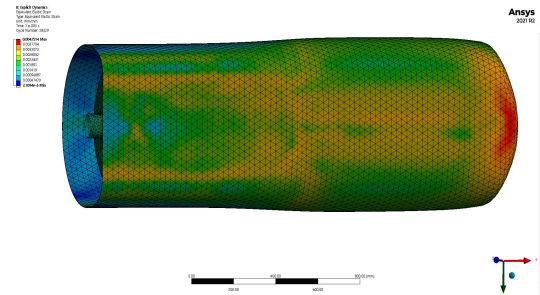


Fig. 8. Analysis result(Equivalent Strain)

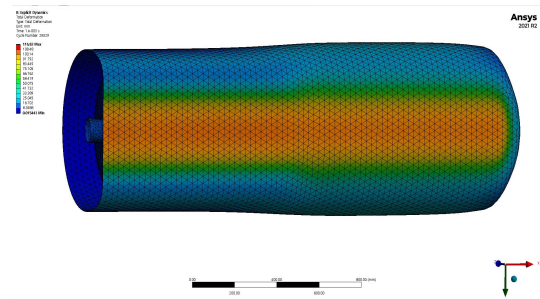


Fig. 9. Analysis result(Total Deformation)

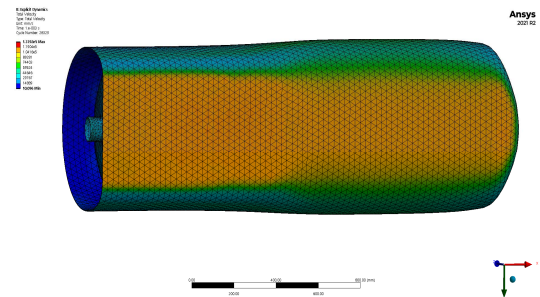


Fig. 10. Analysis result(Total Velocity)

Fig. 9., Fig. 10.에 결과 값을 형상화하여 나타냈다. Fig.5.에 나타나듯이 최대응력은 565.37 MPa으로 용기 후면 우측부에서 발생하였다. 해당 중앙부의 재료는 STS314로 항복강도가 505 MPa임을 보았을 때, 재료의 항복응력 보다 높은 응력이 발생하므로 용기가 충격체의 운동에너지를 흡수하기에는 충분하지 않은 것으로 예측되었다. Fig. 6.에 나타난 등가 소성 변형률은 용기 우측부에서 최대 0.0042514로 나타났다. Fig. 7.에 나타난 용기의 최대 변형량은 용기 중앙부에

서 116.82 mm의 소성변형이 일어났으므로 변형량이 안전기준에 부합하는 값의 한계치를 초과하는 것을 확인할 수 있었다. 해석결과 탱크 중앙부의 큰 변형이 예상되며 탱크 헤드 부분과 변형량이 큰 중앙부에서 파손이 예상된다. Fig. 9., Fig. 10.에 나타난 그래프를 살펴보면 응력값은 시간이 변화함에 따라 증가-감소를 반복하며 변형량은 점차 증가하는 추세를 확인할 수 있었다.

## VI. 결론

본 연구에서는 차량용 LNG 연료용기의 충격 발생에 대해 Explicit Dynamics 해석을 실시하여, 등가응력, 항복응력, 변형량 등에 관해 고찰하였으며, 설계보강 제안을 위한 충돌 사고 시 용기의 취약부를 분석하였다. 차량용 LNG 연료용기의 충돌안전 규정의 만족을 위해서는 국내 충돌안전 설계수준의 상향화가 요구되며 효과적으로 있는 방안을 제시하였고, 그 결과를 제시하였다. 본 연구에서 얻은 결론을 요약하면 다음과 같다.

(1) 국내 자동차 및 자동차 부품 성능과 기준에 관한 규칙에 따른 Explicit Dynamics 해석결과 차량과 용기의 직접적인 충격으로 용기 후면 우측부에서 최대 565.37 MPa의 응력이 발생했다. 재료의 항복응력이 505 MPa인 것을 감안하였을 때 변형량이 항복응력보다 높은 것을 보아 용기가 충격체의 운동에너지를 흡수하기에는 충분하지 않은 것으로 예측되었다.

(2) 최대응력이 발생한 용기 후면 우측부에서 가장 많은 변형이 일어날 것이라고 예측하였지만, 용기 중앙부에서 최대 116.82 mm의 변형이 일어났다. 용기 후면 우측부에서 최대 응력이 발생했음에도 불구하고 용기 중앙부에서 가장 많은 변형이 일어난 것을 확인할 수 있었다.

(3) 해석 결과를 분석해 보았을 때, 중앙부에서 116.82 mm의 큰 변형이 일어나는 것을 감안하면 실증시험을 통해 해석결과와 비교하여 신뢰성 있는 값인지 검토해 볼 필요가 있다고 사료된다.

분석 및 검토결과 용기의 복합재 및 재질 상태와 용기의 이중층 구조가 응력값에 따른 변형량을 다르게 나타냈다고 예측된다. 용기의 충돌 시 변형량과 응력값이 누출공을 발생할 우려가 크기 때문에 용기의 배관계의 가스누출, 각 부분의 온도 및 압력 상태 등을 상시 확인할 수 있는 시스템의 도입도 고려해야 한다. 또한 차량용 LNG 용기의 도입 안정화를 위해서는 용기의 가해지는 직접적인 충격을 줄여주는 지지대 및

완충 보강 설계가 반드시 요구되고 정기적 검사를 위해 검사주기 및 시험기준 등에 있어 구체적인 규정의 제정이 필요하다고 사료된다.

## REFERENCES

- [1] Kim, E. S., "Forensic Engineering Study on Assessment of Damage to Pressure Vessel Because of CNG Vehicle Explosion", *Journal of KSME*, Vol 35(4), 439~455, (2011)
- [2] Kwak, Hyo. Seo., and Jang, Hyo. Seong., and Sereisth. San., and Bae, Jun. Ho., and Kim, Chul., "Vibration and Impact Analysis for the Rack module of CNG Pressure Vessel (Type II)", *Journal of KSME*, 173-174, (2014)
- [3] Ryu, Y. S., and Cho, H. M., and Kim, S. H., "Collision Behavior Evaluation of Flexible Concrete Mattress Depending on Material Models", *Journal of Ocean Engineering and Technology*, 29(1), 70-77, (2015)
- [4] Han, J. O., "Study on Adiabatic Performance of LNG Storage Tank for Vehicles" *Journal of the Korean Institute of Gas*, 12(1), 31-35, (2008)
- [5] Choi, M. J., and Cho, T. J., "A Vibration Test of Fuel Tanks for LNG Vehicles", *Journal of the Korean Institute of Gas*, 19(6), 67-71, (2015)
- [6] Yoon, J. K., and Yoon, K. B., "Discussions on the Safety Characteristics of the NGV Cylinder Types", *KIGAS*, 76-80, (2011)
- [7] Kim, E. S., and Kim, J. H., and Park, Y. S., and Kim, C., and Choi J. C., "Development of an Automated Design System of CNG Composite Vessel using Steel Liner Manufactured by D.D.I.", *Journal of the Korean Society for Precision*, 205-213, (2003)
- [8] Chae, J. M., and Kim, Y. C., and Kim, B. G., and Kim, C. M., and Hong, S. H., "Insulation Structure Analysis of LNG Fuel Tank and Experiment of Alternative Insulation Material", *KIGAS*, 238-243, (2008)
- [9] Son, S. W., and Jung, S. H., and Ahn, S. H., and Kim, J. S., "A Study on Nonlinear Crash Analysis of Railway Tanker According to the Overseas Crashworthiness Regulations", *Journal of the Korea Academia-Industrial*, 21(11), 843-850, (2020)