



## 열해석을 이용한 가스 실린더 캐비닛의 내화성능 최적설계

남민서·김지유\*·<sup>†</sup>김의수\*\*

한국교통대학교 안전공학과 학사과정, \*한국교통대학교 안전공학과 석사과정,

\*\*한국교통대학교 안전공학과 교수

(2022년 1월 26일 접수, 2022년 2월 24일 수정, 2022년 2월 25일 채택)

## Optimum Design on Fire Resistance of Gas Cylinder Cabinets using Thermal Analysis

Minseo Nam · Jiyu Kim · <sup>†</sup>Euisoo Kim

Department of Safety Engineering, Korea National University of Transportation

(Received January 26, 2022; Revised February 24, 2022; Accepted February 25, 2022)

### 요약

특정 고압가스 등을 사용하기 위해 배관과 안전장치 등이 일체로 구성된 가스 실린더 캐비닛은 화재 발생 시 고온의 열로 인한 급격한 압력상승으로 실린더 폭발 및 파편 비산 등의 위험성을 가지고 있다. 이러한 위험성은 용기 내부에 충전된 가스의 유출을 초래하여 중독, 질식 등의 2차 피해를 발생시킬 가능성이 크므로 내부 용기로 인한 피해를 줄이기 위해서는 가스 실린더 캐비닛의 내화성능 확보가 매우 중요하다. 국외의 경우 가스 실린더 캐비닛이 화염에 노출되는 상황에서 일정 시간동안 내부의 실린더를 보호할 수 있도록 미국 NFPA code, 유럽 EN-14470-2 등에서 가스 실린더 캐비닛 내화시험 기준을 규정하고 있다. 하지만 국내의 경우 내압성능과 기밀성능 기준만 명시되어 있고, 그 대상은 배관계로 한정되어 있으며 국외보다 가스 실린더 캐비닛의 내화성능을 위한 연구 및 규정이 미흡한 실정이다. 이에 본 연구에서는 국내 가스 실린더 캐비닛의 내화성능 기준 확립을 위해 유한요소해석 프로그램인 ANSYS를 이용하여 열해석을 수행함으로써 화재 발생 시 구조, 재질 측면에서의 최적 조건을 도출하고자 한다.

**Abstract** - Gas cylinder cabinets have risks such as cylinder explosion and scattering of debris when a fire occurs. These risks are likely to cause gas spills and cause secondary damage. In order to reduce damage, it is very important to secure the fire resistance performance of the gas cylinder cabinet. In foreign countries, NFPA codes in the United States and EN-14470-2 in Europe stipulate fire resistance test standards for gas cylinder cabinets to protect internal cylinders for a certain period of time in a situation where gas cylinder cabinets are exposed to flames. However, in Korea, only internal pressure performance and airtight performance standards are specified, and the target is limited to piping, and research and regulations for the fire resistance performance of gas cylinder cabinets are insufficient compared to overseas. Therefore, in this study, finite element analysis was used to establish fire resistance standards for domestic gas cylinder cabinets. In the event of a fire, optimal conditions are derived in terms of structure and material.

**Key words** : gas cylinder cabinet, fire resistance, optimal design, ANSYS

### 1. 서론

가스 실린더 캐비닛은 외부의 위험으로부터 가스 실린더를 보호하고, 특정 고압가스 등을 사용하기 위한 것으로 배관과 안전장치 등이 일체로 구성된 설비

를 말한다. 가스 실린더 캐비닛이 화재에 노출될 경우 내부에 보관된 가스 실린더는 고온의 열로 인한 급격한 압력상승으로 폭발 및 실린더 파편 비산의 위험성을 야기할 수 있으며 가스의 유출로 인한 중독 및 질식 등의 2차 피해가 발생할 수 있다. 이에 가스 실린더 폭발로 인한 2차 피해를 막기 위해서는 화재에 저항하는 가스 실린더 캐비닛의 내화성능이 굉장히 중요하다. 국외의 경우 가스 실린더 캐비닛이 고온의 열이 가해

<sup>†</sup>Corresponding author: es92kim@ut.ac.kr

Copyright © 2022 by The Korean Institute of Gas

지는 상황에서도 내부의 가스 실린더를 보호할 수 있도록 미국은 NFPA Code, 유럽은 EN-14470-2 등에서 가스 실린더 캐비닛의 내화시험 기준을 규정하고 있다. 국외의 가스 실린더 캐비닛 내화성능 기준을 살펴보면 다른 국가에 비해 미국이 성능 기준에 대하여 화재시험 기준까지 언급하고 내화성능에 대해 자세히 다루고 있는 것을 확인할 수 있다. 하지만 국내의 경우 가스 실린더 캐비닛의 내압성능과 기밀성능 기준만 명시되어 있고 그 대상은 가스 실린더 배관계로 한정하며 가스 실린더 캐비닛의 외곽 프레임에 대한 내화성능 기준은 제시되어 있지 않다. 가스 실린더 캐비닛의 선행연구를 살펴보면 Kim et al.은 가스 실린더 캐비닛의 내부 누출 원인에 대한 유동해석을 통해 공급 설비의 안전운전절차 및 제반 조치사항 검토하였다. [1] Kim et al.은 가스 실린더 캐비닛 내부에 존재하는 누출 위험성을 파악하기 위해 유동해석을 수행하고 위험 감소를 위한 대책을 제시하였다. [2] Lee는 반도체 산업에서 사용되는 공정용 가스의 혼화에 대한 반응 위험성을 제시하고 저장 캐비닛의 보관에 관한 KOSHA GUIDE 작성에 필요한 기초자료를 제시하였다. [3] 내화성능 선행연구를 살펴보면 콘크리트 구조물이나 합성보를 대상으로 수행한 연구가 많은 것을 확인할 수 있었다. 건축물의 초고층화와 인텔리젠트화가 급속히 진행됨에 따라 콘크리트의 고강도화와 고성능화가 요구되고 있어 [4] 콘크리트 구조물을 대상으로 한 내화성능 연구가 활발히 이루어지고 있고 화재 발생 시 고온의 열에 의해 하중 지지력이 감소하고 구조 부재의 급격한 내력상실은 전체 구조물에 큰 피해를 발생시키므로 합성보의 내화성능을 평가하는 연구가 많이 진행되고 있다. [5-6] 이처럼 가스 실린더 캐비닛의 내화성능을 위한 연구 및 규정은 미흡한 실정이다. 이에 본 연구에서는 국내 가스 실린더 캐비닛의 내화성능 기준 확립을 위해 유한요소해석 프로그램인 ANSYS를 이용하여 열해석을 수행함으로써 화재 발생 시 구조, 재질 측면에서의 최적 조건을 도출하고자 한다. 국내에도 국외의 내화시험 기준을 만족하는 가스 실린더 캐비닛이 도입된다면 반도체 산업, 옥외 등에서의 화재 발생 시 가스 실린더 캐비닛으로 인한 추가 피해의 확산을 감소시킬 수 있을 것이라 사료된다.

## II. 국내외 내화성능 기준 및 평가현황

국외의 경우 미국은 OSHA 29 CFR 1910.106, FM Approval Standard 6050, UL 1275 등에서 가스 실린더 캐비닛의 내화성능에 관련된 규정을 제시하고 있다. FM 6050과 OSHA 29 CFR 1910.106에 따르면 가스 실

Table 1. Gas cylinder cabinet regulations.

	Gas cylinder cabinet dimensions	Based on fire resistance.
OSHA 29 CFR 1910.106	○	○
NFPA Code	○	○
UL 1275	○	○
EN14470-1	×	○
EN14470-2	×	○

린더 캐비닛은 ASTM E 119 표준시간 - 온도 곡선에 따른 화재 노출을 견뎌야 하고 화재 노출 시험 시 캐비닛의 모든 조인트, 솔기 및 도어는 시험 후에도 고정 상태를 유지해야 된다고 명시하고 있다. 캐비닛의 상단과 하단, 도어 및 측면의 두께를 18 gauge 이상의 강재로 규정하고 이에 따른 캐비닛의 내화시험을 10분 동안 진행할 때 캐비닛 중앙 내부온도가 325°F (163 °C)를 초과하지 않도록 설계 및 시공 기준 등을 자세히 언급하고 있다. [7-8] 유럽은 EN 14470-1, EN 14470-2 등에서 가스 실린더 캐비닛의 내화성능에 대한 규정을 제시하고 있다. 가스 실린더 캐비닛 내부의 온도가 180K를 초과하지 않도록 제한하고 있으며 가스 실린더 캐비닛 내부에 위치한 실린더의 밸브 스페너 플랫 표면의 온도 상승이 50K를 초과하지 않도록 제한하고 있다. 화재 발생 시 가스 실린더 캐비닛의 안전을 위해 가스 실린더 캐비닛이 최소한 15분 동안 추가적인 위험이나 화재에 기여하지 않도록 규정하고 있으며, 캐비닛의 도어와 측면 및 후면의 벽이 유사한 구조를 가지고 동일한 두께로 제작되어야 한다는 기준이 명시되어 있다. 이렇듯 국외의 경우 가스 실린더 캐비닛의 내화성능과 관련된 규정이 확립되어 있지만 국내의 경우 KGS AA913에 가스 실린더 캐비닛의 배관계에 대한 내압성능과 기밀성능에 관한 기준만 명시되어 있고 화재 발생 시 내부에 위치한 가스 및 실린더를 보호하기 위한 방호조치인 내화성능 측면에 대한 기준은 제시되지 않고 있다. 장기적인 관점으로 바라보았을 때 국외처럼 가스 실린더 캐비닛의 내화성능이 보장된 안전관리 시스템 도입이 필요한 전망으로 보인다.

## III. 유한요소해석

### 3.1. 개요 및 모델링

국내 가스 실린더 캐비닛의 내화성능 기준 확립

을 위한 조건을 알아내기 위해 열해석이 가능한 유한요소 해석 프로그램인 ANSYS 프로그램을 이용하였다. 본 연구에서 활용한 ANSYS 프로그램은 내화성능을 분석하고 예측할 수 있으며 내화실험과 비교한 연구들을 통해 정확성이 검증되었다.[5] ANSYS의 Thermal Analysis를 수행함으로써 화재 발생 시 시간에 따라 변화하는 가스 실린더 캐비닛의 온도분포를 분석하여 한계온도를 초과하지 않는 기준과 구조, 재질 등의 조건을 도출하였다. 해석에 사용된 모델은 국내에서 일반적으로 보급되는 가스 실린더 캐비닛을 대상으로 3D 스캐너를 이용하여 Fig. 1과 같이 스캔 작업을 진행한 후 ANSYS Space Claim을 이용하여 Fig. 2와 같이 실제의 형상과 동일하게 구현하였다. 재료의 물성치는 국내 가스 실린더 캐비닛에 보편적으로 사용되는 SS410의 기계적·열적 성질을 Table 2와 같이 적용하였다. 가스 실린더 캐비닛의 외곽 프레임은 동일한 크기로 구성되어 있고 크기는 해석결과에 영향을 미치지 않으므로 한 면만 해석에 이용하였다. 가스 실린더 캐비닛의 내화성능 조건을 알아보기 위해 ANASYS Thermal Analysis에 적용한 변수는 두께, 구조, 재질이고 두께에 따른 열해석을 수행하여 고온의 열이 가해지는 상황에서도 본래의 강성을 잃지 않는 조건(두께)을 도출하였다. 해석결과로 나타난 경량성 및 경제성의 문제를 해결하고자 단일강판 구조의 가스 실린더 캐비닛을 Fig. 3과 같이 이중강판 공기층 구조로 변경하여 열해석을 수행하였다. 이중강판 공기층 구조의 가스 실린더 캐비닛을 모델로 열해석을 수행함으로써 최적의 구조(두께, 강판 사이의 거리)를 도출하였고 가스 실린더 캐비닛이 본 연구에서 제안하는 구조로 설계될 때 SS410보다 최적의 내화성능을 발휘할 수 있는 재질을 알아보기 위해 내화성과 내식성이 우수한 특성을 가지고 있는 SCM440, SM45C, STS304로 재질을 변경하여 열해석을 수행하였다.



Fig. 1. Process of 3D scanning.

### 3.2. 경계조건

상기에 언급한 바와 같이 국외의 규정을 살펴보면 국내와는 다르게 가스 실린더 캐비닛의 재료, 구조, 성능 기준 등이 제시하고 있는 것을 확인할 수 있다. 특히 미국의 경우 국내를 비롯하여 유럽 및 일본에 비해 가스 실린더 캐비닛의 성능기준에 대하여 화재시험

Table 2. SS410 mechanical property.

Property (Unit)	Value
Density (kg/m <sup>3</sup> )	7800
Melting Temperature (°C)	1480
Young's Modulus (Pa)	2E+11
Poisson's Ratio	0.29
Tensile Yield Strength (Pa)	3.39E+08
Tensile Ultimate Strength (Pa)	6.77E+08
Isotropic Thermal Conductivity (W/m·°C)	25
Specific Heat, C <sub>p</sub> (J/kg·°C)	465

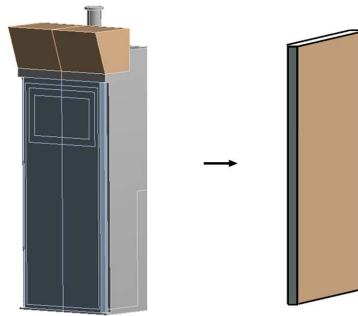


Fig. 2. Gas cylinder cabinet modeling.



Fig. 3. Air layer structure of double steel sheet.

**Table 3.** Boundary conditions according to the US refractory test standards.

Division	Condition
Internal temperature (°C)	163
Minimum thickness (mm)	1.02
Test of fire proof time (min)	10

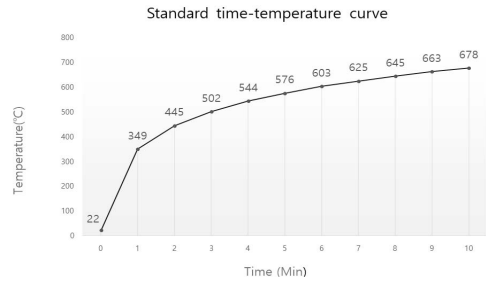
**Table 4.** The temperature of the fire applied to the gas cylinder cabinet.

Time (min)	Temperature (°C)
1	349.2137
2	444.5049
3	502.2893
4	543.8873
5	576.4104
6	603.1176
7	625.7768
8	645.4551
9	662.8464
10	678.4273

기존까지 언급하며 내화성능에 대해 자세히 다루고 있다. 이에 본 연구에서는 가스 실린더 캐비닛의 내화 성능 기준이 자세히 명시되어 있는 미국의 가스 실린더 캐비닛 내화시험 기준(OSHA 29 CFR 1910.106, NFPA Code, UL 1275)을 해석에 필요한 경계조건으로 설정하였으며 해석에 적용한 기준은 Table 3에 나타내었다.

외부에서 가해지는 화재 온도는 국외를 비롯하여 국내 건축법에서도 사용되고 있는 내화 시험방법 일반 요구사항에 명시된 표준시간 온도 곡선 식을 적용하였다. 시간에 따른 온도 곡선 식은 식 (1)과 같고 Table 3에 언급한 바와 같이 10분 동안 해석을 수행하였다. 시간이 변화함에 따라 가스 실린더 캐비닛에 가해지는 온도는 Table 4와 같고, 해석에 적용된 표준시간 온도 곡선 식을 Fig. 4와 같이 그래프로 나타내었다.

$$T = 345 \log_{10}(8t + 1) + 20 \quad (1)$$



**Fig. 4.** Standard time - temperature curve graph.

$T$ : temperature  
 $t$ : time

## V. 해석방법 및 결과

### 4.1. 단일강판 구조 열해석

ANSYS 프로그램의 Thermal Analysis를 통해 시간의 변화에 따라 단일강판에 가해지는 온도분포를 분석하였으며 두께에 따른 열해석을 수행함으로써 한계온도(163°C)를 초과하지 않는 강판의 두께에 대한 최적 조건을 도출하였다. 해석에 사용된 가스 실린더 캐비닛 한 면의 두께는 미국 OSHA 29 CFR 1910.106, NFPA Code에 명시되어 있는 최소설계 두께인 1.02mm로 설정하였다. 열해석 결과 0 ~ 10분까지의 시간동안 22°C ~ 678.4273°C의 열이 가스 실린더 캐비닛에 가해질 경우 단일강판의 최고온도는 678.43°C로 나타났다. 가스 실린더 캐비닛의 두께가 1.02mm로 제작될 경우 해석의 한계온도인 163°C를 초과하기 때문에 국내 KS F 2257-1에 명시되어 있는 강제 두께인 33mm로 두께를 변경하고 동일한 경계조건을 사용하여 추가 열해석을 진행하였다. 그 결과 678.4273°C의 고온의 열이 가스 실린더 캐비닛에 가해지는 상황에서 단일강판이 가지는 최고온도는 148.29°C로 나타났으며 한계온도를 초과하지 않는 것을 확인하였다. 한계온도를 초과하지 않고 가장 근접한 온도분포를 가지는 두께를 알아내기 위해 33mm를 기준으로 두께를 얇게 변경하여 열해석을 수행한 결과 Fig. 5와 같이 강판의 두께가 30mm의 설정 될 때 단일강판에 가해지는 온도가 162.44°C로 나타내며 한계온도를 초과하지 않고 가장 근접한 온도분포를 가지는 최적 두께임을 확인하였다.

### 4.2. 이중강판 공기층 구조 열해석

가스 실린더 캐비닛의 두께가 30mm로 설계되던 한계온도는 초과하지 않지만 제작 비용이나 반도체

산업, 육의 등에서의 사용 시 경량성 문제가 있을 것이라 판단되었다. 이에 미국 UL 1275 (인화성 가스 실린더 보관함)에 명시되어 있는 인화성 가스 실린더 보관함의 구조를 참고하여 가스 실린더 캐비닛의 단일강판 구조를 이중강판 공기층 구조로 변경하여 열해석을 수행하였으며 Table 6과 같은 결과를 도출하였다. Fig. 6 - (a)와 같이 강판의 두께는 1.02mm, 공기층의 간격은 38mm의 이중강판 공기층 구조로 가스 실린더 캐비닛을 모델링하고 단일강판 구조의 열해석과 동일한 경계조건을 바탕으로 열해석을 수행하였다. 해석 결과 68.68°C의 온도분포를 가지며 한계온도를 초과하지 않는 것을 확인하였다. 한계온도를 초과하지 않는 최소한의 두께를 도출하기 위해 캐비닛의 두께를 1.02mm로 고정시키고 두 강판 사이의 거리를 변경하며 열해석을 수행하였다. 그 결과 가스 실린더 캐비닛이 Fig. 6 - (b)와 같이 강판의 두께 1.02mm, 간격 12mm로 제작될 때 160.62°C를 나타내며 가장 근접한 온도분포를 가지는 것을 확인하였다. 이에 가스 실린더 캐비닛이 Fig. 6 - (b)와 같은 구조로 설계된다면 한계온도를 초과하지 않고, 경량성의 문제 또한 없을 것이라 판단하였다. 가스 실린더 캐비닛이 본 연구에서 제안되는 구조로 설계될 시 가스 실린더 캐비닛에 보편적으로 사용되고 있는 SS410 재질보다 우수한 내화성능을 발휘하는 재질을 도출하기 위해 내화성능이 우수한 SCM440, SM45C, STS304을 바탕으로 가스 실린더 캐비닛의 물성치를 Table 6, 7, 8과 같이 변경

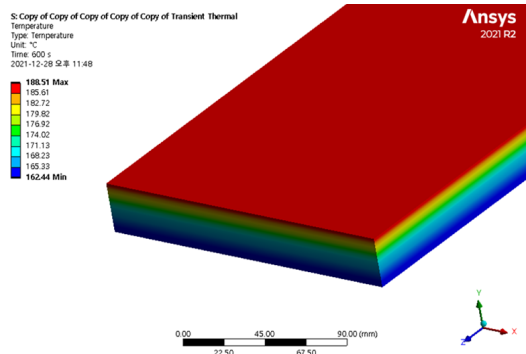


Fig. 5. Transient thermal analysis results.

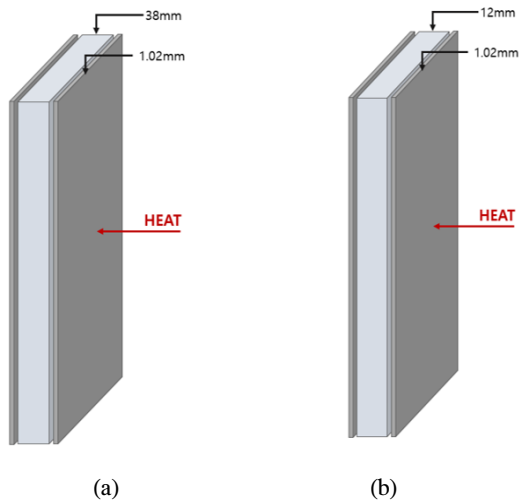


Fig. 6. Changing the air layer spacing.

Table 5. Transient thermal analysis results.  
(Air layer structure of double steel sheet.)

Air layer spacing. (mm)	Thermal analysis result (°C)
38	68.68
35	71.19
33	75.13
30	82.24
25	92.68
20	109.07
15	135.55
14	142.81
13	151.14
12	160.62
11	171.57
10	184.36

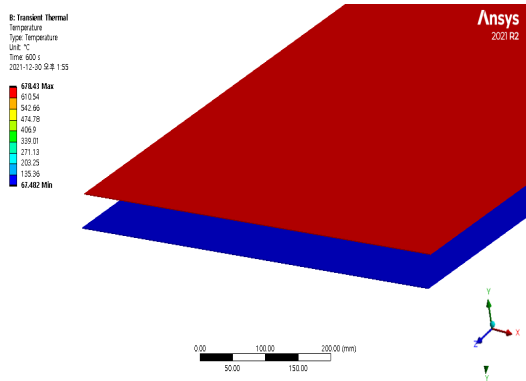


Fig. 7. Transient thermal analysis results.

**Table 6.** Chrome molybden steel (SCM440) material property.

Property (Unit)	Value
Density (kg/m <sup>3</sup> )	7860
Melting temperature (°C)	1414
Young's modulus (GPa)	205
Poisson's ratio	0.29
Tensile yield strength (MPa)	415
Tensile ultimate strength (MPa)	655
Isotropic thermal conductivity (W/m·°C)	42.6
Specific heat, $C_p$ (J/kg·°C)	473.11

**Table 7.** Machine structural carbon steel (SM45C) material property.

Property (Unit)	Value
Density (kg/m <sup>3</sup> )	7800
Melting temperature (°C)	1480
Young's modulus (GPa)	205
Poisson's ratio	0.29
Tensile yield strength (Pa)	4.9E+08
Tensile ultimate strength (Pa)	6.86E+08
Isotropic thermal conductivity (W/m·°C)	49.8
Specific heat, $C_p$ (J/kg·°C)	486

**Table 8.** Stainless steel (STS304) material property

Property (Unit)	Value
Density (kg/m <sup>3</sup> )	8000
Melting temperature (°C)	1480
Young's modulus (Pa)	1.93E+11
Poisson's ratio	0.29
Tensile yield strength (Pa)	2.15E+08
Tensile ultimate strength (Pa)	5.05E+08
Isotropic thermal conductivity (W/m·°C)	21.5
Specific heat, $C_p$ (J/kg·°C)	500

하여 열해석을 수행하였다. 해석 결과 SCM440의 경우 71.42°C, SM45C의 경우 70.23, STS304의 경우 67.48°C의 온도분포를 가지며 Fig. 7과 같이 STS304 재질이 적용된 가스 실린더 캐비닛이 67.48°C로 가장 낮은 온도분포를 가지는 것을 확인할 수 있었다.

## VI. 결론

본 연구에서는 국내 가스 실린더 캐비닛의 내화성능 기준 확립을 위해 유한요소 해석 프로그램인 ANSYS를 이용하여 열해석을 진행한 결과 다음과 같은 결론을 도출하였다.

(1) 국내에서 보편적으로 보급되고 있는 재질과 규격을 바탕으로 가스 실린더 캐비닛을 모델링하고, 미국의 내화시험 기준(OSHA 29 CFR 1910.106, NFPA Code)을 해석의 경계조건으로 설정하여 열해석을 수행한 결과 한계온도(163°C)를 초과하지 않는 가스 실린더 캐비닛의 최소 두께는 30mm로 확인되었다.

(2) 가스 실린더 캐비닛의 두께가 30mm로 제작될 경우 나타나는 경량성 문제를 해결하고자 단일강판 구조의 가스 실린더 캐비닛을 이중강판 공기층 구조로 변경하여 열해석을 수행하였다. 이중강판 공기층 구조를 가진 가스 실린더 캐비닛의 내화성능 조건을 알아보기 위해 두께를 1.02mm로 고정시키고, 강판의 최적 거리를 알아본 결과 최대 12mm의 간격일 때 160°C의 온도분포를 가지며 163°C의 한계온도를 넘지 않는 것을 확인할 수 있었다.

(3) 가스 실린더 캐비닛이 이중강판 공기층 구조(강판의 두께: 1.02mm, 강판 사이의 거리: 12mm)를 가질 때 SS410보다 우수한 성능을 발휘할 수 있는 재질을 도출하기 위해 재료의 기계적·열적 물성치를 변경하여 해석을 수행한 결과 STS304로 구성될 때 68.093°C의 온도분포를 가지며 내화성능이 가장 우수한 것을 확인할 수 있었다.

이에 본 연구에서는 가스 실린더 캐비닛이 두께 1.02mm, 거리 12mm의 이중강판 공기층 구조를 가지고, STS304의 재질이 사용된다면 고온의 열이 가해지는 10분 동안의 상황에서도 본래의 강성을 잃지 않고 내부 실린더를 보호하며 추가 피해의 확산을 감소시킬 수 있을 것이라 판단한다.

## REFERENCES

- [1] Kim, J. D., and Han, S. A., Yang, W. B., and Rhim, J. G., "A study on the Internal Flow Analysis of Gas Cylinder Cabinet for Specialty Gas of Semicon-

- ductor”, *The Korean Institute of Gas*, 74-81(2020)
- [2] Kim, J. D., and Kwon, K. S., Rhim, J.G., Yang, W. B., “A Study on Flow Analysis according to the Cause of Gas Leakage in the Specialty Gas Supply Device for Semiconductors”, *The Korean Institute of Gas*, 42-51(2021)
- [3] Lee, G. W., “Reactivity Considerations with Miscibility of Process Gases in Semiconductor industry”, *The Korean Institute of Gas*, 15-24(2016)
- [4] Song, H., and Ko, J.W, and Sugahara, S., “Thermal Properties and Explosive Spalling for High Strength Concrete”, *Korea Concrete Institute*, 26-32(2008)
- [5] Kwak, S. S., and Choi, B. J., “An Analytical Study on Composite Beam Performance with Post-Fire Temperature Using ANSYS Program”, *Korea Academy Industrial Cooperation Society*, 391-400 (2019)
- [6] Kang, M. J., and Moon. B.C., and Choi, Y. H., Kim. S.B., and Kim. S. S, “An Experimental Study on the Fire Resistance Performance and Residual Strength of Composite Beams(HyFo Beams) after Fire”, *Korean Society Of Steel Construction*, 117-118(2021)
- [7] FM 6050, “APProval Standard for Storage Cabinets for Ignitable(Flammable) Liquids”, FM Approvals (2016)
- [8] OSHA 29 CFR 1910.106, “RedBook: How to Handle Flammable Liquids Safely”, Justrite(2014)
- [9] Kim, E. S., “Forensic Engineering Study on Assessment of Damage to Pressure Vessel Because of CNG Vehicle Explosion”, *Journal of KSME*, Vol 35, No. 4, pp.439~455 (2011)
- [10] Kim, E. S., “The Shape Optimal Design of Shaft Serration Using Design of Experiment and Finite Element Method”, *Korean Society for Precision Engineering*, 72-79(2008)