

최적화 설계를 통한 혼합가스 성능시험용 고온 고압 용기의 제작

구현곤^{*,#}, 류형민^{*}, 안재웅^{*}, 배영관^{*}, 김진희^{**}

^{*}한화디펜스 종합연구소, ^{**}국방과학연구소

Manufacture of High-temperature High-pressure Vessel for Mixed Gas Performance Test via Optimized Design

Hyoun-Kon Ku^{*,#}, Hyung-Min Ryu^{*}, Jae-Woong Ahn^{*}, Young-Gwan Bae^{*}, Jin-Hee Kim^{**}

^{*}R&D Division of Hanwha Defense, ^{**}Agency for Defense Development

(Received 10 September 2019; received in revised form 22 September 2019; accepted 30 September 2019)

ABSTRACT

In this study, the high-temperature high-pressure vessel was successfully manufactured, which can be used to store pressurized air and to increase the temperature for the mix performance test of high-temperature high-pressure air with coolant (e.g., water). In this research, static structure analysis and transient thermal analysis were performed using the commercial software Midas NFX 2015 R1. Based on the results, the optimized pressure vessel design was carried out. As a result of the optimized design, the minimum stress and minimum weight were found at 120 mm of the vessel thickness, and the optimized pressure vessel was verified. Finally, through manufacture and performance test (e.g., the non-destructive inspection and hydraulic pressure test), the reliability and safety were validated for the designed pressure vessel.

Key Words : Optimization Design(최적화 설계), High-temperature High-pressure Vessel(고온 고압 용기), Transient Thermal Analysis(열전달 해석), Static Structure Analysis(정적 구조 해석), Hydraulic Pressure Test(수압시험)

1. 서 론

혼합가스란, 고온 고압으로 분사되는 발사체의 사출 가스에 냉각제 (물 또는 에탄올 등의 혼합물)를 분사하여 기체, 액체, 수증기의 다양한 형태의 상이 혼합된 상태를 말한다. 혼합가스를 이용해 사출 가스의 온도와 압력을 조절하면, 육지와 함상, 수중에서 발사체의 사출 에너지를 가변 할 수 있는

장점이 있다. 이러한 혼합가스의 연구에서 가스와 냉각제의 적절한 혼합 비율을 찾아내기 위한 혼합 가스 성능시험에는 고온 고압의 압축공기를 생산 및 저장 할 수 있는 압력 용기가 필요하다.

고압으로 압축된 물질의 저장을 위해 다양한 분야에서 압력 용기가 사용되고 있으며, 그 유형에 따라 금속 실린더, 후프-랩 실린더, 폴리-랩 실린더, 복합재 실린더로 구분되며 이중 복합재 실린더의 경우는 로켓 모터, 우주 왕복선 및 수중 음파 탐지기 장비 등 고가의 산업 분야에 사용되고 있다.

현재까지 압력 용기에 대한 연구는 고압으로 압

Corresponding Author : Hyounkon.ku@hanwha.com

Tel: +82-55-280-6004

Copyright © The Korean Society of Manufacturing Process Engineers. This is an Open-Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution-Noncommercial 3.0 License (CC BY-NC 3.0 <http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0/>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

축된 저장 물질의 안전성 확보와 더불어 보관 및 이동의 편리를 위해 경량화에 대한 연구가 주를 이루고 있으며, 제작의 어려움이나 사용 장소, 목적 등의 제약으로 인해 고온 혹은 고압의 단일 조건에 대한 연구가 주로 이루어지고 있는 실정이다.

본 연구에서는 혼합가스 성능시험에 사용할 수 있는 고온 고압 용기의 제작을 목표로 가장 오래된 사용 경험으로 인해 높은 기술적 안정성을 제공하는 금속 재질의 고온 고압 용기를 제작하고자 한다. 금속 재질의 고온 고압 용기는 단일 금속으로 제작되어 설계, 제작 및 검사 방법이 단순하고 검사과정에서 결함을 비교적 쉽게 발견 할 수 있어 용기의 결함을 사용 전에 확인 및 예방 할 수 있는 장점이 있다.

고온 고압 용기의 제작을 위해 우선, 압력 용기의 설계에서 가장 널리 사용되고 있는 ASME BPVC Section VII Boiler & Pressure Vessel Code - General Requirement for Design and Construction에 따라 용기의 셸과 헤드부의 두께를 산정하고, 이를 선형 구조 해석과 발열 조건을 적용한 선형 열전달 해석을 수행하여 검증하였다.

그 결과를 토대로 용기의 두께에 따른 용기 중량, 최대 응력, 최대 변위 등을 설계인자로 시험계 확보에 따라 표본을 추출하고 최적화 설계를 실시하였다. 최적화 설계 결과에 따라 상세 설계를 수행하고 용기를 제작하여 비파괴 검사와 내압 시험을 통해 용기의 신뢰성과 안전성을 검증하였다.

2. 고온 고압 용기의 설계

2.1 고온 고압 용기의 설계

혼합가스 성능시험을 위해 고온 고압 용기가 만족해야 하는 요구 성능은 다음의 Table 1과 같다.

Table 1 Requirement of pressure vessel

Contents	Value
Maximum Temperature	400 [°C]
Maximum Pressure	4300 [Psi] (≅ 30MPa)
Vessel volume	1000 [L]

Table 2 Material property of SA182-F304

Contents	Value
Density	8 [g/cm ³]
Tensile strength	485 [MPa]
Young's modulus	193 [GPa]
Poisson ratio	0.29
Heat conductivity	0.0157 [W/mm·°C]
Specific heat	510 [J/kg·°C]

고온 고압 용기의 제작을 위한 재료는 강도와 내부식성을 만족하기 위해 Stainless steel 계열로 선정하였으며 재료의 수급과 제작의 편의성을 고려하여 SA182-F304 (SUS304)로 선정하였다.

SA182-F304의 물리적 특성은 위의 Table 2와 같다. 요구 성능을 만족하기 위해 ASME BPVC Section VII 에서 요구하는 고온 고압 용기 길이 방향 셸의 최소 두께 t 는

$$t = \frac{PR}{SE - 0.6P} \quad (1)$$

헤드의 최소 요구 두께 t 는

$$t = \frac{PR}{2SE - 0.2P} \quad (2)$$

여기서,

P = 내부 설계압력 [MPa]

R = 고려중인 셸의 내부 반경 [mm]

D = 헤드 스커트의 내경; 혹은 타원형

헤드 주축의 내부 길이 [mm]

S = 최대 허용 응력 [MPa]

E = 원통형 셸에서의 적당한 이음 효율

t = 셸의 최소 요구 두께 [mm]

으로 이중에서, SA182-F304가 용기의 요구 조건인 400 [°C]에서 허용 응력은 107 [MPa] 이므로 S=107 [MPa], E는 통상 이음 효율인 1을 적용하여 E=1로 계산하였다.

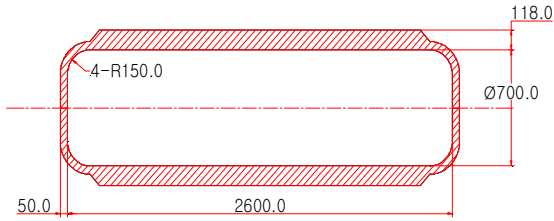


Fig. 1 Drawing of pressure vessel



Fig. 2 Drawing of pressure vessel after modification

식 (1)을 통해 계산된 고온 고압 용기 쉘의 최소 요구 두께 t 는

$$\begin{aligned}
 t &= \frac{PR}{SE-0.6P} \\
 &= \frac{30 \times 350}{107 \times 1 - 0.6 \times 30} \\
 &= 117.9 [mm] \quad (3)
 \end{aligned}$$

식 (2)을 통해 계산된 고온 고압 용기 헤드의 최소 요구 두께 t 는

$$\begin{aligned}
 t &= \frac{PR}{2SE-0.2P} \\
 &= \frac{30 \times 350}{2 \times 107 \times 1 - 0.2 \times 30} \\
 &= 50.5 [mm] \quad (4)
 \end{aligned}$$

위의 계산식 (3), (4)를 통해 설계된 고온 고압 용기의 형상은 위의 Fig.1 과 같다.

모재 수급과 제작의 편의성을 위해 용기 헤드의 두께를 쉘과 같은 두께로 변경한 결과 형상은 위의 Fig.2 와 같다.

2.2 유한 요소 해석

설계된 고온 고압 용기의 적정성을 평가하기 위해 Midas NFX 2015 R1을 이용하여 선형 구조해석 및 선형 열전달 해석을 수행하였다.

유한 요소 해석 모델의 경계조건은 Fig.3과 같다.

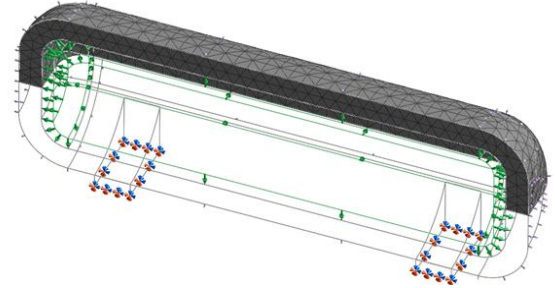


Fig. 3 Boundary condition

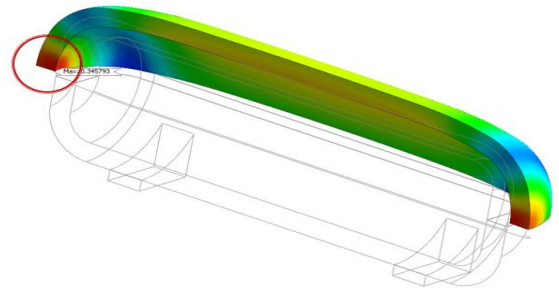


Fig. 4 Maximum displacement

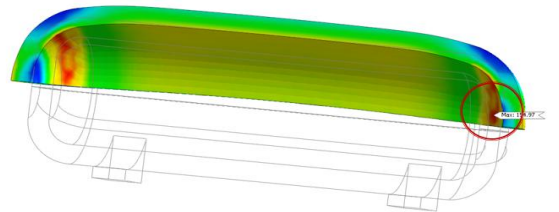


Fig. 5 Boundary condition

Table 3 Result of finite element analysis

	Structure Analysis	Thermal Analysis
Maximum Stress	154.97 [MPa]	200.69 [MPa]
Maximum Displacement	0.35 [mm]	4.91 [mm]
Temperature	-	199.44 [°C]

해석 속도와 신뢰도 향상을 위해 1/4 분할 모델을 사용하였으며 용기 고정을 위한 서포터 하부 면에 고정 구속을 적용하고 용기 내부에 작용하는 압력은 29.9 [MPa], 용기 내부 대류 조건은 온도: 400 [°C] / 계수: $2e^{-5}$ [W/mm²·°C], 용기 외부 대류 조건은 온도: 25 [°C] / 계수: $2e^{-5}$ [W/mm²·°C]을 적용하였다.

구조 해석 결과 최대 응력은 154.97 [MPa]로 용기의 내부의 셸과 헤드 가 만나는 헤드 가장자리에서 나타났으며 최대 변위는 0.35 [mm]로 용기 헤드 중심에서 나타났다.

열전달 해석 결과 용기에 발생하는 최대 온도는 199.44 [°C]로 용기 내부 셸의 중심에 나타났으며, 용기에 발생하는 최대 응력은 200.69 [MPa]로 용기 외부 셸의 중심에서, 최대 변위는 4.91 [mm]로 용기 외부 헤드의 가장자리에서 나타났다.

2.3 최적화 설계

유한 요소 해석의 결과를 이용하여 용기의 두께와 용기의 중량, 응력을 설계를 진행하였다. 실험계획법에 따라 직접 표본을 선정하고 각 표본에 대한 유한 요소 해석결과로 근사 모델을 찾아가는 방법을 사용하였다. 근사 모델에 영향을 주는 주요 인자로는 Cost에 직접적인 영향을 미치는 중량과 최대 응력에 가장 큰 Factor를 부여하였다.

그 결과 용기 두께 120 [mm]에서 가장 낮은 응력과 비교적 적은 용기 중량을 가지는 것으로 나타났다. Fig. 6을 살펴보면 용기의 두께가 두꺼워질수록 변위, 온도는 선형적으로 감소하고 용기의 중량은 선형적으로 증가하는 경향을 가지는데, 용기에 발생하는 최대응력은 용기 두께 120 [mm] 까지 선형으로

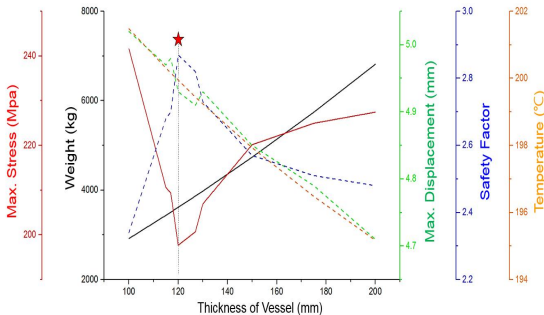


Fig. 6 Result of optimization design

로 감소하다 120 [mm] 이후로 다시 증가하는 추세를 보이고 있다.

이는 용기의 두께가 두꺼워 질수록 내부에 작용하는 열응력이 증가되기 때문인 것으로 판단된다. 이러한 결과는 ASME BPVC code를 이용하여 설계한 용기 두께 117.9 [mm]와 유사한 결과를 가지는 것으로 나타났다.

3. 고온 고압 용기의 제작

3.1 고온 고압 용기의 제작

설계된 고온 고압 용기의 형상에 고온 고압의 가스를 배출하기 위한 출구 플랜지, 내부의 압축 공기를 가열시키기 위한 공기 가열기 설치 플랜지, 용기 인양을 위한 Lug, 용기의 단열 보온 및

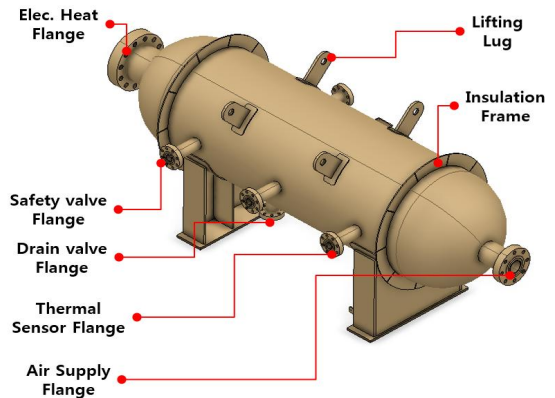


Fig. 7 Detail design of pressure vessel



Fig. 8 Manufacture of pressure vessel

사용자의 안전을 위한 보온재 설치 플랜지를 추가하여 제작을 진행하였다.

용기의 헤드 부분은 Hot Forming 후 열처리하여 제작하였고, 쉘 부분은 원기둥 형태의 소재를 가공하여 제작하였다. 이후 각 구성 품들을 용접하여 완성하였다.

3.2 고온 고압 용기의 검사

제작된 고온 고압 용기의 안전성과 신뢰성을 확보하기 위하여 내압 시험을 진행하였다. 내압 시험의 기준 압력은 한국가스안전공사의 고압가스용 저장탱크 및 압력용기 제조의 시설·기술·검사기준인 KGS AC111에 근거하여 설정하였다. KGS AC111에서 정의하는 내압 시험 압력은

$$P_t = \mu P \left(\frac{\sigma_t}{\sigma_d} \right) \quad (5)$$

여기서,

P_t = 내압 시험 압력 [MPa]

P = 설계 압력 [MPa]

σ_t = 수압 시험 온도에서의 재료의
허용 응력 [N/mm²]

σ_d = 설계 온도에서의 재료의
허용 응력 [N/mm²]

E = 원통형 쉘에서의 적당한 이음 효율

t = 쉘의 최소 요구 두께 [mm]

μ 의 값은 아래의 Table 4를 기준으로 결정하였다. 용기에 작용하는 최대 압력은 30 [MPa]이므로 Table 4에 따르면 μ 값은 1.25 이지만 조금 더 가혹한 조건에서 안전성을 평가하기 위해 1.3 으로 결정하였다.

Table 4 Requirement of pressure vessel

Pressure range	μ
Below 20.6 [MPa]	1.3
20.6 [MPa] < μ ≤ 98 [MPa]	1.25
Above 98 [MPa]	1.1 ≤ μ < 1.25

Table 5 Hydraulic pressure test condition

	Theory	Actuality
Test Pressure	50.3 [MPa]	51.2 [MPa]
Test Temperature	40.0 [°C]	10.0 [°C]
Test Time	1 [Hr.]	1 [Hr.]



Fig. 9 Hydraulic pressure test

σ_t 와 σ_d 의 값은 ASME Section VIII Maximum Allowable Stress Values S for Ferrous Materials를 기준으로 결정하였으며, $\sigma_t = 138$ [MPa], $\sigma_d = 107$ [MPa] 이다. 따라서 내압 시험 기준 압력은

$$\begin{aligned} P_t &= \mu P \left(\frac{\sigma_t}{\sigma_d} \right) \\ &= 1.3 \times 30 \times \left(\frac{138}{107} \right) \\ &= 50.3 \text{ MPa} \end{aligned} \quad (6)$$

위의 수식을 통해 결정된 내압 시험의 기준은 위의 Table 5와 같으며 실제의 내압 시험은 기준보다 조금 더 가혹한 조건에서 진행되었다.

내압 시험 결과 고온 고압 용기의 각 플랜지 부에서 누수나 용기 외부의 변형·파손 등이 발생하지 않았다.

4. 결론

본 연구에서는 고온 고압의 발사체 사출가스와 냉각제의 적절한 혼합 비율을 찾아내기 위한 혼합

가스 성능시험에 사용되는 고온 고압 압력 용기의 설계, 제작 및 안전성 평가를 수행하였다.

고온 고압 용기의 제작을 위해 ASME BPVC code를 이용하여 요구 조건을 만족하는 최소한의 용기 두께인 118 [mm]를 계산하였다. 이를 이용하여 구조해석과 열전달 해석을 수행한 결과, 용기에 발생하는 최대 온도는 199.44 [°C]로 용기 내부 쉘의 중심에 나타났으며, 용기에 발생하는 최대 응력은 200.69 [MPa]로 용기 외부 쉘의 중심에서, 최대 변위는 4.91 [mm]로 용기 외부 헤드의 가장자리에서 나타났다.

유한 요소 해석의 결과를 이용하여 용기의 두께와 용기의 중량, 용기에 발생하는 응력을 설계 변수로 설정하여 표본을 선정한 후 각 표본에 대한 유한 요소 해석결과로 근사 모델을 찾아가는 최적화 설계를 수행하였고 용기 두께 120 [mm]에서 가장 낮은 응력과 비교적 적은 용기 중량을 가지는 것으로 나타났다. 최적화 설계 결과를 토대로 용기의 제작을 위한 상세 설계를 수행하였고 용기를 제작하였다.

제작된 용기의 안전성과 신뢰성을 확보하기 위해 한국가스안전공사의 검사 기준인 KGS AC111에 근거하여 내압 시험을 수행하였으며 내압 시험 결과 고온 고압 용기의 각 플랜지 부에서 누수나 용기 외부의 변형 파손 등이 발생하지 않았다.

본 연구를 통해 혼합가스 성능시험에 사용되는 단일 금속 재질의 고온 고압 압력 용기의 설계, 제작, 검사를 성공적으로 완료하였다.

후 기

“이 논문은 2017년도 핵심기술(응용연구) 연구비 지원에 의하여 연구되었음.”

REFERENCES

1. Kim, Y. K., “Comparison of Safety and Light Weight through Design and Finite Element Analysis of Netting Analysis of Pressure Vessels by Type of CNG,” A Thesis for a Masterate,

Pusan National University, Republic of Korea, 2017.

2. The American Society of Mechanical Engineers, “BPVC Section VIII - Rule for Construction of Pressure Vessels,” ASME, Vol. 1 UG-99, pp. 75-76, 2017.
3. The American Society of Mechanical Engineers, “BPVC Section VII - Recommended Guideline for the Care of Power Boiler,” ASME, Part D-Metric, pp. 86-89, 2017.
4. Korea Gas Safety, “Facility/Technical/Inspection Code for Manufacture of Storage Tanks and Pressure Vessels for High-pressure Gases,” KGS AC111, pp. 75-76, 2017.