

<학술논문>

DOI <https://doi.org/10.3795/KSME-A.2017.41.4.263>

ISSN 1226-4873(Print)
2288-5226(Online)

선박용 휴대형 질소용기(11 kg, 10 L 및 50 bar)의 두께 및 외형 설계

성한샘* · 김재열** · 엄태진** · 곽효서*** · 이광오*** · 김 철****

* 부산대학교 기계융합기술학과, ** 원광밸브주식회사, *** 부산대학교 기계기술연구원
**** 부산대학교 기계공학부

Design of Portable Welded-Nitrogen Vessel (11 kg, 10 L and 50 bar) for Shipbuilding

Hansaem Seong^{*}, Jaeyeol Kim^{**}, Taejin Eom^{**}, Hyo Seo Kawk^{***},
Kwang O Lee^{***} and Chul Kim^{****†}

* Mechanical Convergence Technology, Pusan Nat'l Univ., ** Wonkwang Valve Co., LTD.,
*** Research Institute of Mechanical Technology, Pusan Nat'l Univ.
**** School of Mechanical Engineering, Pusan Nat'l Univ.

(Received July 12, 2016 ; Revised November 2, 2016 ; Accepted January 2, 2017)

Key Words: Welded Pressure Vessel(용접식 압력용기), Welding Tensile Residual Stress(용접인장잔류응력), Transient Thermal-Structural Coupled Field Analysis(과도 열-구조 연성해석), Fatigue Analysis(피로 해석)

초록: 조선소에서 사용되는 대형 섯오프 밸브의 개폐를 위한 용기의 경우, 저압의 고정식 대형 공기탱크가 사용되고 있는데, 이는 먼 거리에 있는 밸브에 공압을 공급해야 할 경우, 추가 배관이 필요하며 수송 도중 압력 강하가 발생하는 문제점이 있다. 이에 본 논문에서는 작업자들의 편의성을 증대시키고, 공기 누설로 인한 폭발 방지를 위하여 고압의 휴대형 용접식 질소용기(11 kg, 10 L 및 50 bar)의 설계를 수행하였다. 구조적으로 취약한 용접부를 최소화하기 위하여 용기의 외형을 타원형으로 설계하였으며, 기준 무게 및 용적 충족과 사용압력에 대한 구조안전성을 확립하기 위하여 용기의 두께와 장단축 비를 설계하였다. 또한 용접 잔류응력 예측을 위해 APDL(ANSYS Parametric Design Language)을 이용하여 과도 열-구조 연성해석을 수행하였으며, 내압에 의한 구조안전 및 피로수명을 검증하였다.

Abstract: The shipbuilding industry uses large stationary tanks to store low-pressure air, which is used to open and close large shut-off valves. However, when supplying air from the tank to a distant valve, there are problems related to the need for supplementary pipes and the pressure drop during transportation. In this study, a portable welded vessel for storing high-pressure nitrogen (11 kg, 10 L, and 50 bar) was designed to prevent air leakage and improve the convenience of workers. This pressure vessel was elliptical to reduce the number of welded parts, which are structurally weak. The thickness and ratio of the major and minor axes of the pressure vessel were calculated to verify its structure stability at the working pressure (50 bar), and that the proposed weight and capacity were satisfactory. The residual stress caused by the welding process was calculated by performing a transient thermal-structural coupled field analysis using the ANSYS parametric design language (APDL), and the fatigue life of the vessel was verified based on the Goodman criterion.

- 기호설명 -

p : 사용압력
t : 용기의 두께

r : 용기의 반경
 σ_Y : 소재의 항복강도
E : 탄성계수
v : 포아송비
 η : 용접효율
C : 부식여유

† Corresponding Author, chulki@pusan.ac.kr
© 2017 The Korean Society of Mechanical Engineers

- S_e : 피로한도
- S_u : 인장강도
- S_f : 파괴강도
- σ_{min} : 최소응력
- σ_{max} : 최대응력
- σ_m : 평균응력
- σ_a : 교변응력
- P_0 : Goodman 선도에서 시작점(예하중 점)
- P_1 : 평균응력 및 교변응력의 좌표(σ_m, σ_a)
- P_2 : Goodman 선도와 $\overline{P_0P_1}$ 의 교차점
- l_{total} : $\frac{P_0P_2}{l}$
- l : $\frac{P_0P_1}{l}$

1. 서 론

조선소 및 선박에서는 화재 발생 시 위험 유체를 차단하기 위해 대형 섯오프 밸브(Shut off valve)가 사용되는데, 직경이 150 mm를 초과하는 밸브의 경우, 인력으로는 빠른 시간 내에 개폐가 불가능하기 때문에 공기탱크에 저장된 공압을 사용한다. 기존에는 돛부 및 바닥부와 실린더부가 용접으로 접합된(3 pieces) 고정식 대형 저압 탱크(350 kg ~ 2 ton, 200 L ~ 2000 L 및 7 bar ~ 9 bar)에 공기를 저장하기 때문에 화재나 폭발 등에 대한 위험이 있으며, 먼 거리에 있는 밸브에 공압을 공급해야 할 경우 추가 배관을 필요로 하며 공급 도중 발생하는 압력강하로 인하여 효율이 저감된다. 또한 이론적 근거를 통한 구조 설계가 이루어지지 않아 용기의 두께가 과도하며, 피로수명 및 용접부에 대한 신뢰성이 파악되지 않아 잦은 교체가 이루어지고 있는 실정이다. 이에 본 논문에서는, 작업자들의 편의성 및 효율성을 증대시키고 공기 누설로 인한 폭발 방지를 위하여, 휴대형 용접식 질소용기(11 kg, 10 L 및 50 bar)를 Fig. 1의 흐름도(Flow chart)에 따라 개발하였다. 구조적으로 취약한 용접부를 최소화하기 위하여 용기의 외형을 타원형(2 pieces)으로 설계하였으며, 기준 무게 및 용적을 충족함과 동시에 사용압력에 대한 구조안전성을 만족하는 용기 형상의 설계를 수행하였다. 또한 용접 잔류응력 예측을 위해 APDL(ANSYS Parametric Design Language)을 이용하여 과도 열-구조 연성해석을 수행하였으며, Goodman 선도를 이용하여 내압에 의한 피로수명을 검증하였다.

2. 용기 형상의 설계

2.1 용기의 두께 설계

Fig. 2와 같이 축대칭 형상의 압력용기의 미소면

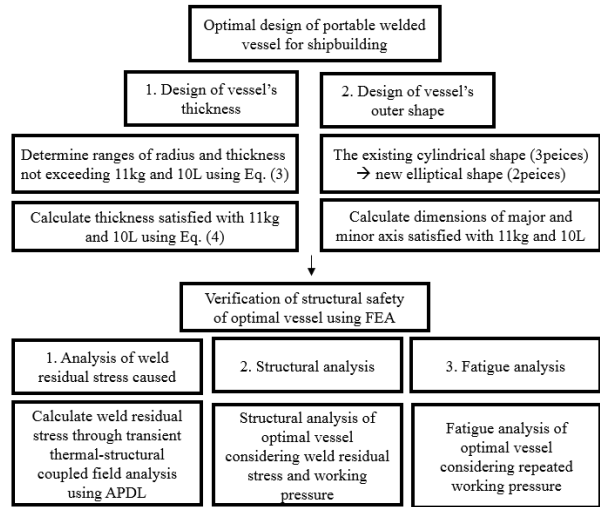


Fig. 1 Flow chart for design of portable welded-nitrogen vessel

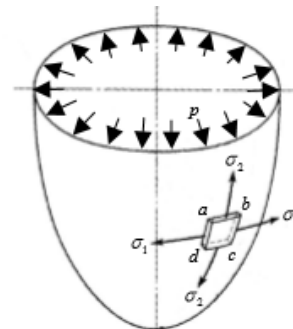


Fig. 2 Stress components of an axisymmetric pressure vessel⁽¹⁾

적 abcd에 내압 p에 의해 발생하는 원주방향 응력(σ_1) 및 길이 방향 응력(σ_2)은 아래 식 (2)와 같다.⁽¹⁾

$$\frac{\sigma_1}{r_1} + \frac{\sigma_2}{r_2} = \frac{p}{t} \tag{1}$$

여기서 길이방향으로 충분히 길거나 구속이 없다고 가정하면 내압 p가 작용할 때 용기의 벽면에 걸리는 응력은 식 (3)과 같이 나타낼 수 있다.

$$\sigma_2 = 0 \tag{2}$$

$$\sigma_1 = \frac{pr_1}{t} \tag{3}$$

식 (3)⁽¹⁾을 이용하여 소재가 SUS304인 용적 10 L의 용기에 작동압력(50 bar)을 부여하였을 때, 두께(3 mm~7 mm) 및 반경(80 mm~130 mm)에 따른 용기 내부에 발생하는 응력을 계산하여 Fig. 3에 나타내었다. 반경이 커지고 두께가 작아질수록 용

Table 1 Design parameters for calculating thickness of welded pressure vessel (SUS304)

p(MPa)	r(mm)	σ_Y (MPa)	η	C(mm)
5	80~130	205	0.7~1	1

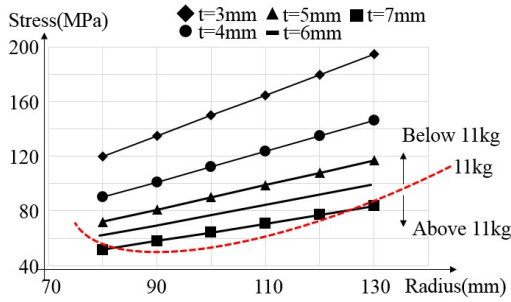


Fig. 3 Stress trend according to the thicknesses and radii of cylindrical pressure vessel

기에 발생하는 응력이 증가하며, 두께가 7 mm 이상일 경우 반경이 82 mm 이하 및 126 mm 이상일 때 용기의 무게가 작업자들이 휴대하기에 적합한 11 kg을 초과한다.

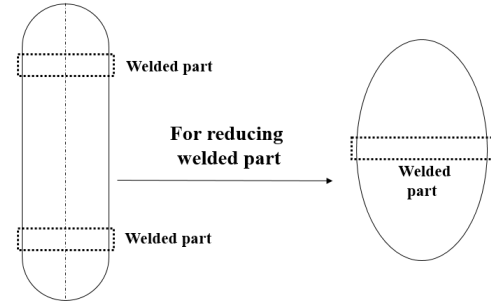
한국가스공사에서 제시한 식 (4)⁽²⁾를 이용하여 Table 1의 조건일 때 축대칭 형상의 용기 두께를 계산하였다. 용접부의 강도와 모재의 강도의 비를 나타내는 용접효율의 경우, 가혹한 조건으로 0.7로 가정하였다. 용기의 특성상 선박 혹은 조선소에서 사용되어 해수에 의한 부식이 예상되므로 용기의 두께를 여유 있게 설계해야 한다. 따라서, 한국가스공사에서 제시한 압력용기 강도계산 및 설계기법⁽²⁾을 토대로 1 mm의 부식 여유를 적용하였다. 반경이 80 mm~130 mm일 때 용기에 두께가 3.91 mm~5.73 mm로 계산되어, 가장 가혹한 조건에서의 두께를 6 mm로 결정하였다.

$$t = \frac{p \times r}{\sigma_Y \times \eta - 1.2p} + C \quad (4)^{(2)}$$

2.2 용기의 외형설계

용기의 형상을 기존과 같이 원통형(3 pieces)으로 제작할 경우 구조적으로 취약한 용접부가 2부위이므로, 본 연구에서는 용접부를 1부위로 줄이기 위하여 Fig. 4와 같이 용기의 외형을 타원(2 pieces)으로 결정하였다.

타원형 용기의 두께가 6 mm 및 부피가 10 L일 때, 장축 대 단축의 비율에 따른 용기의 질량을 계산하여 Fig. 5에 나타내었다. 용기의 형상이 원에 가까워질수록 질량 및 용적이 커지고, 장축



The existing cylinder vessel (3 pieces) New elliptical vessels (2 pieces)

Fig. 4 A new elliptical vessel for reducing welded part

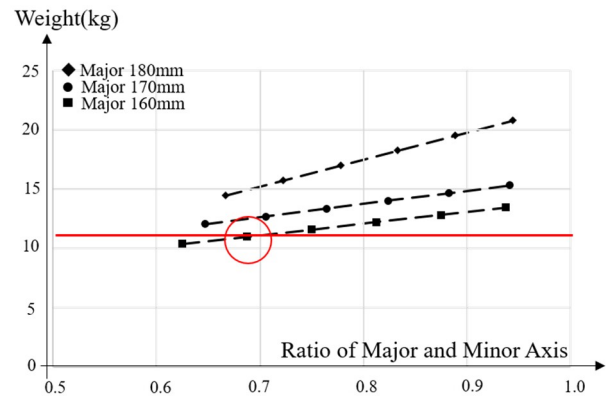


Fig. 5 Weights of elliptical vessels according to the ratios of major axis and minor axis when the capacity is 10 L and the thickness is 6 mm

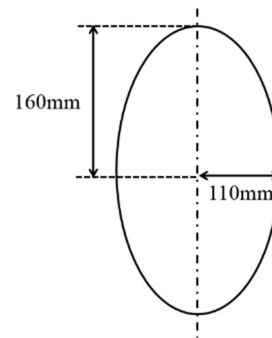


Fig. 6 Elliptical vessel with maximum capacity, having the weight of 11 kg

160 mm 및 단축 110 mm일 때 질량 11 kg 미만 및 용적 10 L 이상을 만족하였으며, 이를 Fig. 6에 나타내었다.

3. 잔류응력을 고려한 용기의 구조안전 판단

3.1 용접 잔류응력 도출을 위한 유한요소해석
장축 160 mm 및 단축 110 mm인 형상을 갖는

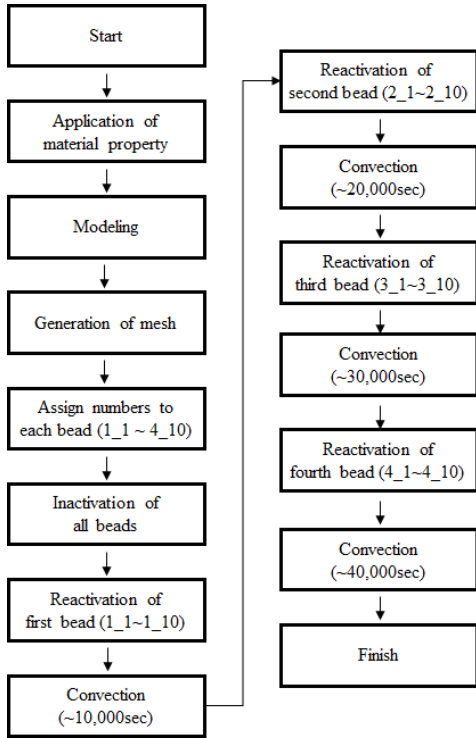
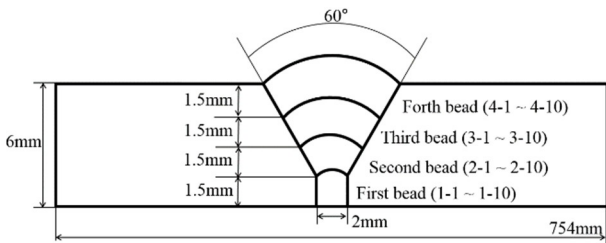
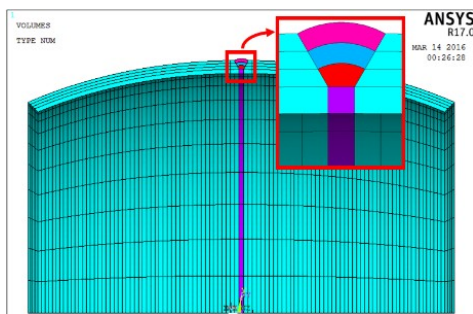


Fig. 7 Process of transient thermal-structural coupled field analysis using APDL



(a) Cross section of the welding part



(b) Section model

Fig. 8 3D Modeling for transient thermal- structural coupled field analysis

타원형 용기의 용접 잔류응력을 예측하기 위하여 Mechanical APDL 17.0을 이용하여 해석을 수행하였다.

Table 2 Analysis conditions of welding process

	Process	Weld speed	Time allocation	Cumulative time (sec)
1	First bead	9.4	9.27	9.27
2	First convection	-	9990.73	10000
3	Second bead	10.16	8.72	10008.72
4	Second convection	-	9991.28	20000
5	Third bead	10.16	8.81	20008.81
6	Third convection	-	9991.19	30000
7	Final bead	10.16	8.91	30008.91
8	Final convection	-	9991.09	40000

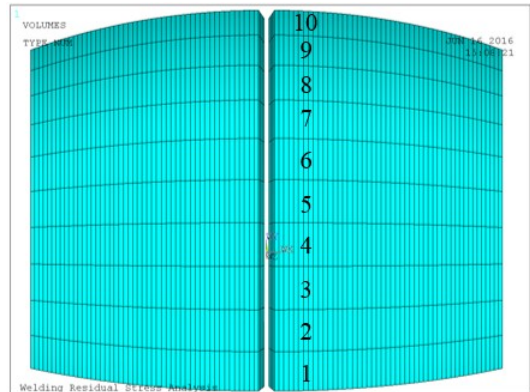


Fig. 9 The base material with inactivated beads before welding process

시간에 따른 용접비드 생성을 구현하기 위해 Element birth and death를 이용하였으며 이로 인한 재료물성의 변화와 접촉을 고려해야 하므로 비선형해석을 수행하였으며, 용접비드 생성으로 인한 구조의 변화가 온도분포에 영향을 주므로 쌍방향 과도 열-구조 연성해석을 수행하였다. Fig. 7에 용접 잔류응력해석 과정을 나타내었으며, 용접부를 포함한 해석 모델의 단면 형상 및 해석 시간 단축을 위한 부분 모델을 Fig. 8에 나타내었다. 현장의 경험을 토대로 각각 1.5 mm의 두께를 가지는 4개의 용접비드를 생성하여 4번의 용접공정을 반복하여 수행하였다. 또한 해석의 정확성 및 편의성을 위하여 하나의 비드를 10개로 나누었으며 총 40개의 비드에 대한 번호(1-1, 1-2 .. 2-1, 2-2 .. 3-1, 3-2 .. 4-9, 4-10)를 부여하였다.

용접비드 생성에 의한 잔류응력 예측을 위해 Fig. 9와 같이 모델링된 4개의 용접비드를 비활성화시킨 상태에서, 시간에 따라 첫 번째 비드의 1-1

```
ESEL,S,TYPE,,2,5
EKILL,ALL
```

(a) Inactivation of beads

Thermal

```
*DO,I,1,10
TIME,I*0.927
TIMINT,ON
NSUBST,10
CMSEL,S,WELD2_%%I%
EALIVE,ALL
NSLE,,1
D,ALL,TEMP,1400
*IF,I,GE,2,THEN
CMSEL,S,WELD2_%(I-1)%
NSLE,,1
DDELE,ALL,TEMP
*ENDIF
ALLSEL,ALL
SOLVE
*ENDDO
```

Structural

```
*DO,I,1,10
II=IS+I
TIME,T_POINT(II)
CMSEL,S,WELD2_%%I%
EALIVE,ALL
LDREAD,TEMP,,T_POINT(II),,'WRS3D_TMM',,'RTH'
ALLSEL,ALL
SOLVE
*ENDDO
```

(b) Reactivation of beads

Thermal

```
TIME,10
NSUBST,10
CMSEL,S,WELD2_%%I%
DDELE,ALL,TEMP
ALLSEL,ALL
SOLVE
TIME,10000
TIMINT,OFF
NSUBST,1
SOLVE
```

Structural

```
*DO,J,1,10
JJ=II+J
TIME,T_POINT(JJ)
LDREAD,TEMP,,T_POINT(JJ),,'WRS3D_TMM',,'RTH'
ALLSEL,ALL
SOLVE
*ENDDO
```

(c) Convection

Fig. 10 APDL code developed for simulating welding process

부터 4번째 비드의 4-10까지 하나씩 순차적으로 활성화함으로써 용접비드 생성을 구현하는 Element birth and death 기능을 이용하여, 실제 용접 공정과

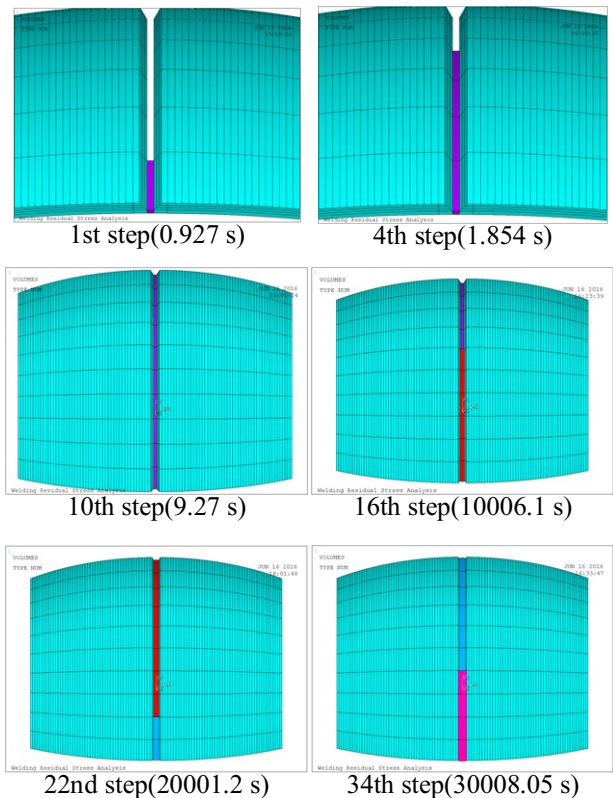


Fig. 11 Reactivation of inactivated beads

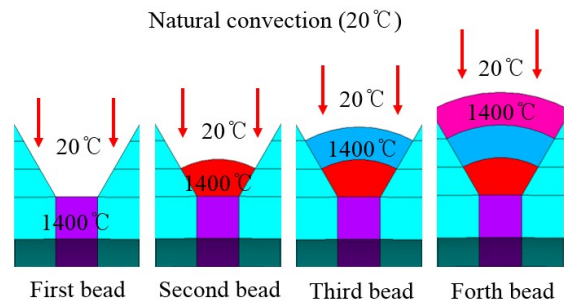


Fig. 12 Natural convection condition (20°C) after reactivation of each bead

동일하게 진행되도록 구현하였으며 이를 구현하기 위한 APDL 코드를 Fig. 10에, 코드에 의하여 구현되는 형상을 Fig. 11에 나타내었다.

용접비드는 1400°C의 온도로 생성되며, 시행착오법을 통하여 비드를 주변온도(20°C)까지 충분히 냉각시키기 위한 10,000초의 자연대류조건(Natural convection condition)을 부여하였고 이를 Fig. 12에 나타내었다.

유한요소해석을 위한 격자, 각 비드에서의 용접 조건 및 경계조건을 Fig. 13 및 Table 2에 나타내었다. 용접속도는 현장의 경험을 바탕으로 적용하였으며 비드 생성 시간을 통해 조절하였다.

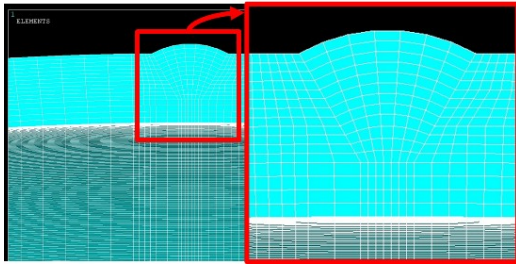


Fig. 13 Generation of mesh for transient thermal-structural coupled field analysis

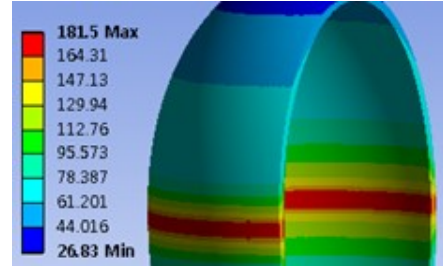


Fig. 16 Result of structural analysis considering both working pressure and tensile residual stress

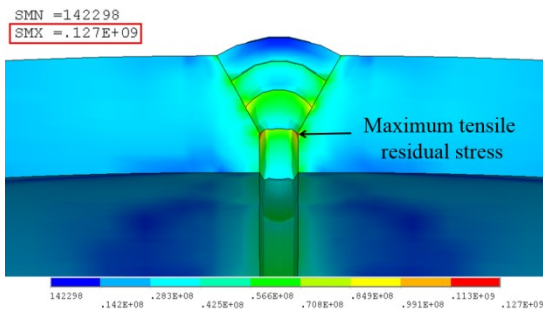


Fig. 14 Distribution of tensile residual stress caused by welding process

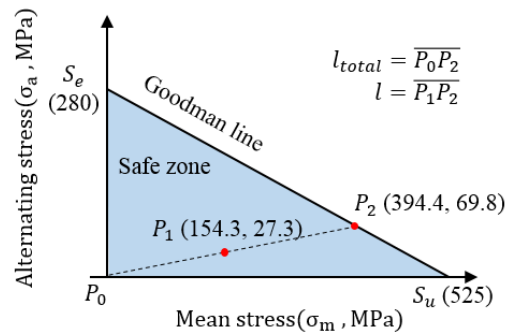


Fig. 17 Fatigue analysis of the vessel using Goodman criteria

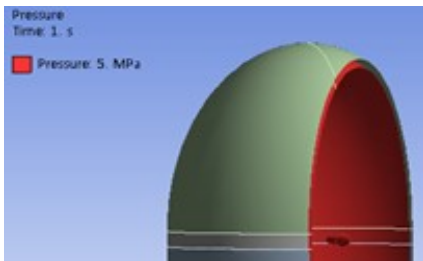


Fig. 15 Load condition (50 bar) for structural analysis of the elliptical vessel

과도 열-구조 연성해석을 수행한 결과, 용접부에서 인장잔류응력은 첫 번째 비드에서 네 번째 비드로 갈수록 응력이 점점 낮아지는 경향을 보였으며, 최대인장잔류응력은 첫 번째 비드에서 127 MPa이 나타났으며, 이를 Fig. 14에 나타내었다.

3.2 인장잔류응력과 작동압력을 고려한 압력용기의 구조해석

용접에 의한 인장잔류응력과 작동압력을 고려한 상태에서 압력용기의 구조안전성을 검증하기 위하여 상용 유한요소해석 소프트웨어인 Ansys Workbench 16.1을 이용한 유한요소해석을 수행하였다. 압력용기의 벽면에 대하여 수직방향으로 균일하게 내압이 작용한다고 가정하고 Fig. 15와 같이 50 bar의 하중을 부여하였다.

유한요소해석 결과, Fig. 16과 같이 용기의 중심부에서 갈수록 유효응력이 높아졌으며, 용접부에서 최대유효응력 181.5 MPa이 나타났으며 이는 항복강도 205 MPa 보다 낮은 값이다.

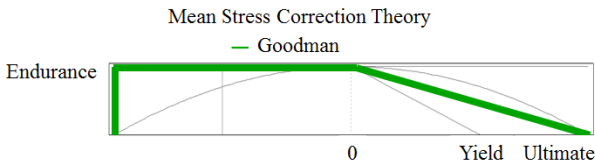
3.3 용기의 피로수명 예측

3.3.1 이론식을 통한 용기의 피로수명 예측

본 연구의 선박용 압력용기의 재료는 SUS304로 연강이 아닌 취성이 강한 소재이며, 인장강도가 파괴강도(S_e)에 접근하는 정도가 높은 강(취성)이다. 또한 내압을 부여하였을 때, 용기에 작용하는 응력상태가 소성영역이 아닌 탄성영역이므로, 피로해석을 위하여 ‘수정된 Goodman선도’가 아닌 ‘Goodman선도’를 적용하여 이론적 계산을 수행하였다.⁽¹⁵⁾ 최소응력(σ_{min})은 용접으로 인해 발생한 인장잔류응력인 127 MPa이며, 사용압력(50 bar) 부여 시 발생한 181.5 MPa을 최대응력(σ_{max})으로 적용하였다. 이를 토대로 식 (6)과 식 (7)에 의하여 평균응력(σ_m) 154.3 MPa 및 교번응력(σ_a) 27.3 MPa을 계산 하였다. 이는 Goodman 선도의 아래에 위치하므로 무한수명을 가질 것으로 사료되며 이를 Fig. 17에 나타내었다. 용기가 예하중(0 MPa)을 받는 상태일 때 좌표점을 P_0 , P_0 와 P_1 을 연결한 선분이 Goodman 선도와 교차하는 점을 P_2 라 정의할 때, P_0P_1 에 대한 P_0P_2 의 비를 피로에 대한 안전율

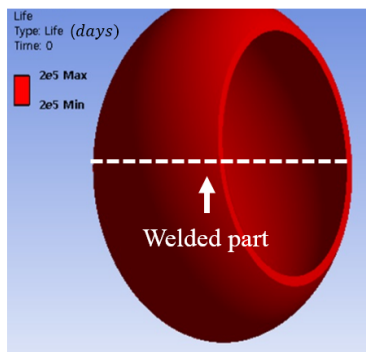
Options	
Analysis Type	Stress Life
Mean Stress Theory	Goodman
Stress Component	Equivalent (Von Mises)
Life Units	
Units Name	days
1 cycle is equal to	0.2 days

(a) Definition of 1 cycle



(b) Application of Goodman criteria in FEA

Fig. 18 Boundary condition for fatigue analysis of the pressure vessel



$2 \times 10^5 \text{ days} = 1 \times 10^6 \text{ cycles}$

Fig. 19 The result of the fatigue analysis of the pressure vessel

(S)이라 하며, 식 (8)에 의하여 압력용기의 안전율이 2.6으로 나타났다.

$$\frac{\sigma_a}{S_e} + \frac{\sigma_m}{S_u} = 1 \quad (5)$$

$$\sigma_m = \frac{\sigma_{max} + \sigma_{min}}{2} \quad (6)$$

$$\sigma_a = \frac{\sigma_{max} - \sigma_{min}}{2} \quad (7)$$

$$S = \frac{l_{total}(\overline{P_0 P_2})}{l(P_0 P_2)} \quad (8)$$

3.3.2 유한요소해석을 통한 용기의 피로수명 검증
Goodman 선도를 이용한 용기의 피로수명을 검증하기 위하여 Ansys Workbench 16.1을 이용한 유한요소해석을 수행하였다. 작동압력(50 bar)의 경우 3.2절의 구조해석과 동일하다. 또한, Fig. 18과 같이 피로수명의 단위를 days로 설정하였으며, 1일 최대

5회 질소를 충전하므로 1 cycle은 0.2 days이다.

피로해석 결과, Fig. 19와 같이 압력용기 전체에서 2×10^5 days의 피로수명, 즉 하루에 5번 반복하므로 1×10^6 cycles의 무한수명을 가지는 것으로 나타났다.

4. 결론

본 논문에서는 기준 무게 및 용적을 만족하는 휴대형 용접식 질소용기(11 kg, 10 L 및 50 bar)의 형상 설계를 수행하였다. 과도 열-구조 연성 해석을 통하여 용접 잔류응력 및 작동환경을 고려한 용기의 구조해석을 수행하였으며, Goodman 선도를 이용한 피로수명을 검증하였다.

(1) 타원형 용기의 장단축 비에 따른 내압에 의해 발생하는 응력, 질량 및 용적에 대한 연구를 수행하였으며, 질량 11 kg 미만 및 용적 10 L 이상을 만족하는 형상(두께 6 mm, 장축 160 mm 및 단축 110 mm)을 결정하였다.

(2) 용기의 용접잔류응력을 예측하기 위하여 APDL을 이용한 과도 열-구조 연성해석을 수행하였다. 4개의 비드를 각 10개로 나누어, 고온의 비드가 시간에 따라 생성되는 실제 용접과 동일한 공정을 구현하여 유한요소해석을 수행한 결과, 최대 용접 인장잔류응력이 127 MPa로 나타났다.

(3) 용접 인장잔류응력 및 사용압력 50 bar를 고려한 타원형 용기의 구조해석을 수행한 결과, 항복강도 (205 MPa) 보다 낮은 최대유효응력(181.5 MPa)이 도출되어 구조적으로 안전할 것으로 사료되며 피로해석 결과에 따르면 용기는 무한수명을 가질 것으로 사료된다.

후 기

이 논문은 2015년도 정부(교육부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 기초연구사업임(No. 201523870001)

참고문헌 (References)

- (1) Wang, J. C., 2005, "Stress Analysis of an Elliptical Pressure Vessel Under Internal Pressure," A Seminar submitted to the Faculty of Rensselaer at Hartford in Partial Fulfillment of the Requirements for the Degree of MASTER of Science, pp. 7~9.
- (2) Korea Energy Agency, 2014, "Pressure Vessel Strength Calculation and Design Technique".

- (3) Lu, X., 2002, "Influence of Residual Stress on Fatigue Failure of Welded Joints," A Dissertation Submitted to the Graduate Faculty of North Carolina State University in Partial Fulfillment of the Requirements for the Degree of Doctor of Philosophy, pp. 131~133.
- (4) Oh, S., Yoon, H. K., Cha, Y. H. and Sam, K. W., 2003, "Mechanical Behavior of Materials," Wonchang, Incheon, pp. 141~144.
- (5) TSNE, 2013, "ANZINE," TSNE, Seoul, Vol. 28, pp. 27~29.
- (6) KS D 3698, 2015, "Cold Press," p. 7.
- (7) Bae, J. H., Lee, H. W., Kim, M. S. and Kim, C., 2013, "Optimal Process Planning of CNG Pressure Vessel by Ensuring Reliability and Improving Die Life," *Trans. Korean Soc. Mech. Eng. A*, Vol. 37, No. 7, pp. 865~873.
- (8) Kim, H., Bae, W., Jang, Y. and Kim, C., 2008, "Optimal Design of the Fuel Storage Vessel of CNG Automobile by Considering Structural Efficiency," *Trans. Korean Soc. Mech. Eng. A*, Vol. 32, No. 6, pp. 465~473.
- (9) Joung, T.-H., Lee, J.-H., Nho, I. S., Lee, P.-M. and Aoki, T., 2004, "Pressure Vessel Design and Structural Analysis of Unmanned Under-water Vehicle," *Journal of the Society of Naval Architects of Korean*, Vol. 41, No. 6, pp. 140~146.
- (10) Kim, C. K. and Kim, D. H., 2011, "A Safety Study on the Stress Characteristics of a Composite Pressure Cylinder for a Use of 70 MPa Hydrogen Gas Vehicle," *Korean Society of Manufacturing Technology Engineers*, Vol. 21, No.1, 2012. 2. pp. 1~6.
- (11) Ullah Dar, N., Qureshi, E. M. and Hammouda, M.M.I., 2009, "Analysis of Weld-induced Residual Stresses and Distortions in Thin-walled Cylinders," *Journal of Mechanical Science and Technology*, 23, 1118~1131.
- (12) Song, J. B., Bae, W. B., Cho, Y. J., Hwang, S. M., Cho, Y. H., Cho, J. R., Park, S. W. and Park, S. H., 2010, *Mechanical Engineering Design*, KYOBO BOOK, Seoul, pp. 384~404.
- (13) Park, J. W., 2011, "Precision Welding Engineering," Iljinsa, Seoul, pp. 99~131.
- (14) Kwak, H. S. and Kim, C., 2016, "Structure Integrity of Rack Module for Compressed Natural Gas (CNG) Pressure Vessel - under Automotive Collision and Vibration," *Journal of Mechanical Science and Technology*, Accepted.
- (15) Yasuoka, M., Wang, P., Zhang, K., Qui, Z., Kusaka, K., Pyoun, Y. S. and Murakami, R. I., 2013, "Improvement of the Fatigue Strength of SUS304 Austenite Stainless Steel using Ultrasonic Nanocrystal Surface Modification," *Surface & Coatings Technology*, Vol. 218, No. 15, pp. 93~98.