

100L-700MPa급 초고압 용기 설계 기술 개발

박보규*, 이호준*, 이인준*, 박시우*, 조규상**,#

*한국섬유기계융합연구원, **동양대학교 기계시스템학과

Development of Design Method on High Pressure Vessel of 100L-700MPa Grade

Bo-Gyu Park*, Ho-Joon Lee*, In-Jun Lee*, Si-Woo Park*, Kyu-Shang Cho**,#

*Korea Textile Machinery Convergence Research Institute,

**Department of Mechanical System, Dong Yang University

(Received 27 May 2019; received in revised form 5 June 2019; accepted 16 June 2019)

ABSTRACT

An ultra-high pressure treatment device is a device used for increasing the shelf life of food by sterilizing it by applying hydrostatic pressure to solid or liquid food. The ultrahigh pressure treatment system developed in this study is a pressure vessel with a processing capacity of 100 L and a maximum pressure of 700 MPa. Pressure vessels for ultrahigh-pressure processing equipment are manufactured using wire-winding techniques. The design formula for making ultra-high pressure vessels with wire windings is given in ASME Section VIII - Division 3. In this study, the ratio of the cylinder to the winding area that can be applied in a wire-winding application was analyzed using a finite element analysis. Furthermore, the relationship between the variation of the residual stress in the vessel and the ratio of the winding area due to the variation of the winding tension was analyzed, and a design guide applicable to the actual product design was developed. Finally, the design equation was modified by presenting the coefficients to correct the difference between the finite element analysis and the design equation.

Key Words : High Pressure Treatment(초고압처리), Pressure Vessel Design(압력용기 설계), Wire-Winding Technique(와이어와인딩 기술)

1. 서 론

초고압 처리(HPP, High Pressure Processing)는 밀폐된 유체의 일부에 압력을 가하면 유체 내 모든 곳에 같은 크기로 전달된다는 “파스칼의 원리”에 따라 내용물의 모든 방향으로 가압이 이루어지는 것을 이용한 설비이다. 초고압 처리 장치는 세라믹

산업에서 많이 사용되고 있었으나, 최근 식품에 HPP처리를 하면 식품 내부 미생물의 사멸로 인하여 식품의 유통 기한을 늘릴 수 있는 장점으로 인하여 식품산업에도 많이 적용되고 있다^{[1],[2]}.

초고압 처리장치는 압력용기, 가압 시스템 그리고 압력용기를 지지하는 프레임으로 구성된다. 본 논문에서 개발하고자 하는 장치는 초고압 처리장치를 구성하는 압력용기이다. 압력용기의 제작은 최근 복합재를 실린더 표면에 와인딩하여 제작하는

Corresponding Author : kscho@dyu.ac.kr

Tel: +82-54-630-1221, Fax: +82-54-630-1308

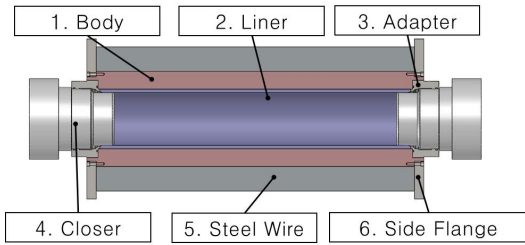


Fig. 1 Components of high pressure vessel

방식이 많이 사용되고 있으나^[3-5], 이러한 방식으로 제작된 압력용기는 고압의 저장용기에 적합한 방식으로 압력용기 내부에 식품이 삽입되는 처리 장치에 적용하기에 적합하지 않다.

개발하고자 하는 HPP처리용 압력용기는 최대압력이 700MPa이며 처리 가능한 용량은 100L에 이르는 대형 HPP설비로 Fig. 1에 압력용기와 구성품을 나타내었다. 초고압 압력용기의 설계는 용기의 내부 실린더에 잔류응력을 발생시켜 높은 압력을 견딜 수 있도록 설계되며, 초기 잔류응력을 발생시키기 위한 방법으로 오토프레타즈(Autofrettage) 또는 와이어 와인딩 기술이 사용된다^[6,7].

본 논문에서는 높은 잔류응력이 발생 가능한 와이어 와인딩으로 용기를 제작하기 위하여 ASME Section VII Division 3^[8]에 제시된 설계식의 적용가능 범위를 분석하였고, 유한요소 해석을 이용하여 정확한 잔류응력을 예측하기 위한 설계식을 보정하였다.

2. ASME Code를 이용한 설계

2.1 ASME 설계식

와이어 와인딩을 이용한 압력용기의 설계는 ASME Sec. VII Division 3에 제시된 설계식을 이용한다. 와이어 와인딩시 내부 실린더는 압축응력을 받게 되며, 발생하는 압축응력의 크기는 와이어 와인딩시 적용 장력 S_w 에 의하여 결정된다. 임의의 반경 x_1 에 대한 반경방향 응력 $\sigma_r(x_1)$ 과 접선방향 응력 $\sigma_t(x_1)$ 및 변위(δ)는 아래의 식 (1), (2), (3)을 이용하여 계산된다.

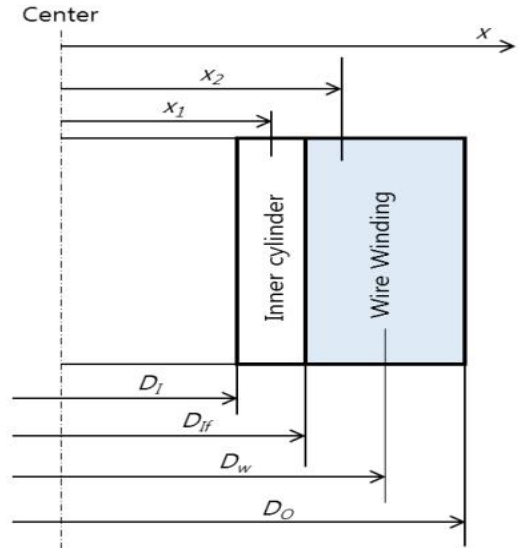


Fig. 2 Nomenclature for wire-wound cylinders

$$\sigma_r(x_1) = - \left[1 - \left(\frac{D_1}{x_1} \right)^2 \right] \int_{D_i}^{D_w} \left(\frac{x}{x^2 - D_i^2} S_w(x) \right) dx \quad (1)$$

$$\sigma_t(x_1) = - \left[1 + \left(\frac{D_1}{x_1} \right)^2 \right] \int_{D_i}^{D_w} \left(\frac{x}{x^2 - D_i^2} S_w(x) \right) dx \quad (2)$$

$$\delta = - \frac{2D_1}{E} \int_{D_i}^{D_w} \left(\frac{x}{x^2 - D_i^2} S_w(x) \right) dx \quad (3)$$

D_1 는 실린더의 내경이며, D_{if} 는 실린더의 외경이자 와이어 와인딩의 경계면이다. 와인딩 영역의 임의의 반경 $x_2 (< D_w)$ 에 대한 $\sigma_r(x_2)$ 와 $\sigma_t(x_2)$ 는 아래의 식 (4), (5)에 의해 계산된다.

$$\sigma_r(x_2) = S_w(x) - \left[1 + \left(\frac{D_1}{x_2} \right)^2 \right] \int_{x_2}^{D_w} \left(\frac{x}{x^2 - D_i^2} S_w(x) \right) dx \quad (4)$$

$$\sigma_t(x_2) = - \left[1 - \left(\frac{D_1}{x_2} \right)^2 \right] \int_{x_2}^{D_w} \left(\frac{x}{x^2 - D_i^2} S_w(x) \right) dx \quad (5)$$

상기의 식은 와인딩시 적용되는 장력 S_w 이 일정한 경우 쉽게 계산이 가능하다. 와인딩 공정이 끝난 경우 $D_w = D_o$ 가 되며 각 변수는 Fig. 2에 나타내었다.

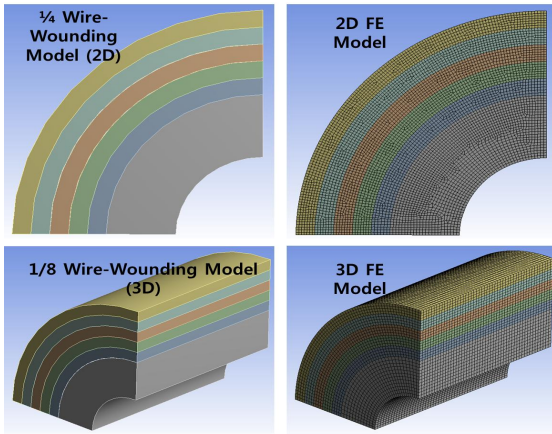


Fig. 3 FE analysis model

2.2 유한요소 해석

와이어 와인딩 과정을 묘사하기 위하여 설계된 용기를 2D 및 3D로 해석을 수행하고 이를 설계식과 비교 검증하였다. 유한요소 해석은 다음의 절차를 통하여 수행하였다⁹⁾.

와이어 와인딩 구간을 임의의 레이어로 분리하여 모델링 한 후 실린더에 첫 번째 레이어를 장력을 주어 와인딩으로 인한 응력 해석을 수행하였다. 해석된 응력은 다음 레이어 해석시 잔류응력으로 입력하여 해석을 수행하는 방법으로 정해진 레이어의 수만큼 반복으로 수행하였다.

Fig. 3은 해석에 사용된 모델을 나타내었다. 해석에 사용된 요소는 2D해석의 경우 2D 솔리드요소를 3D 해석은 육면체요소를 사용하였으며 계산은 상용 해석 프로그램인 ANSYS를 사용하여 수행하였다. Fig. 4, 5는 해석결과를 정리하여 나타낸 것으로 와인딩 부분을 5 layer 이상으로 모델링 하여 해석하는 경우 설계식과 비교적 잘 일치함을 확인하였다. 2D로 해석을 수행한 경우 설계식과 비교적 유사하게 일치함을 보여주며 layer가 증가할수록 설계식과의 차이가 좁혀질 것으로 보인다. 3D 해석의 경우 2D 해석과 달리 실린더와 winding의 경계면에서 응력값이 달라지는 결과를 나타내었다. 이는 2D 해석에서 고려하지 않은 길이방향 응력에 의한 영향으로 판단되나 전체적인 영향이 크지 않아 이후 해석은 2D 솔리드 요소를 사용하여 수행하였다.

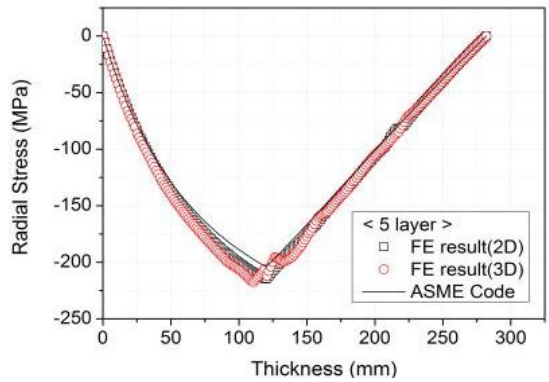


Fig. 4 Comparison of initial radial stress between FE result and ASME Code

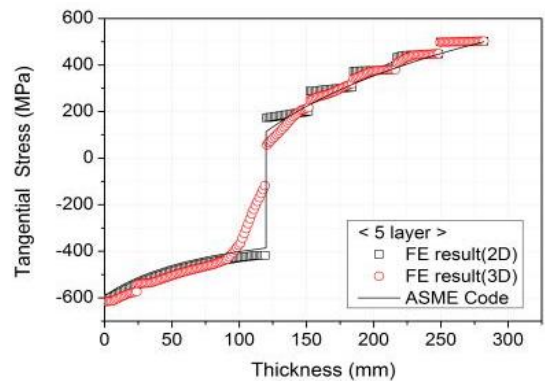


Fig. 5 Comparison of initial tangential stress between FE result and ASME Code

2.3 ASME 설계식의 적용 범위

내부 용기와 와인딩 영역의 비율의 적용 범위를 분석하기 위하여 table 1과 같이 내경, 외경을 고정하고 와인딩 비율(실린더두께/와인딩두께)을 변경하여 유한요소 해석과 실제 이론식에 적용한 결과를 비교하였다. Fig. 6~7은 와인딩 비율에 따른 이론식과 해석결과를 비교하여 나타내었다. 와인딩 비율이 증가할수록 이론식과 해석결과의 차이가 증가하며, 와인딩 비율이 감소할수록 차이가 감소한다. 와이어 와인딩시 중요하게 고려해야 할 부분은 접선방향 응력이며, 위의 결과를 고려할 때 접선방향 응력을 기준으로 실린더의 비율은 최소 30%이상을 유지하는 것이 바람직 할 것으로 보인다.

Table 1 Analysis case

D_i	D_o	D_w	Winding Ratio		Winding Tension
			Cylinder	Winding	
300	860	356	0.1	0.9	300
		468	0.3	0.7	
		524	0.4	0.6	
		580	0.5	0.5	
		692	0.7	0.3	

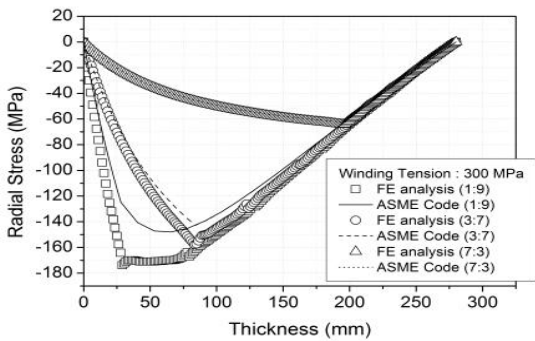


Fig. 6 Initial radial stress distribution with variation of winding ratio

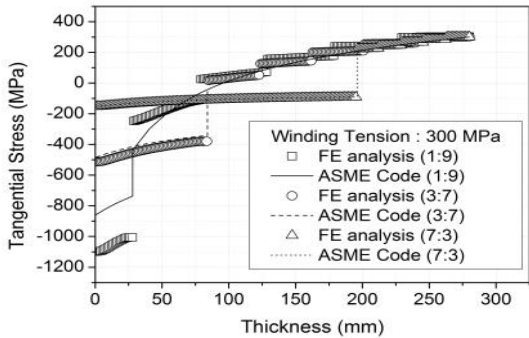
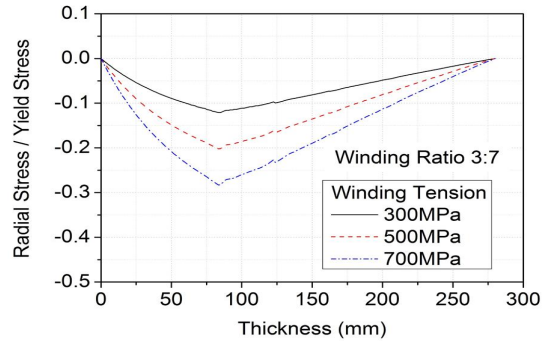


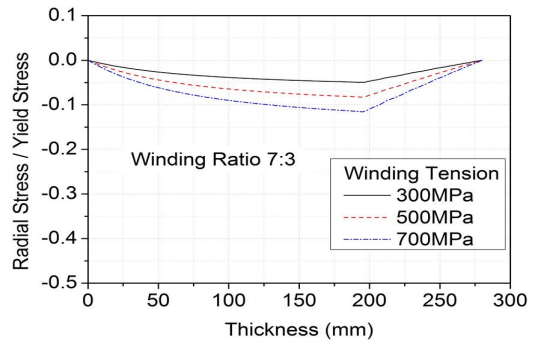
Fig. 7 Initial tangential stress distribution with variation of winding ratio

2.4 와인딩 장력의 영향

Fig. 8, 9는 와인딩 장력 변화에 따른 반경방향 및 접선방향 응력을 실린더의 항복강도와 비교하여 나타내었다. 사용된 재료는 실린더는 STS630재질로 항복강도 1,279MPa 이며 wire는 KSD3510강으로 항복강도는 1,750MPa이다.



(a) Winding ratio = 3:7



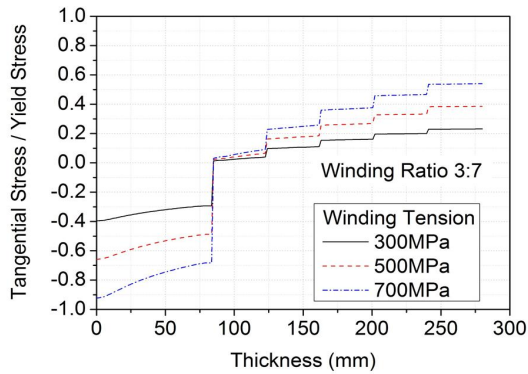
(b) Winding ratio = 7:3

Fig. 8 Radial Stress distribution with changes of winding tension

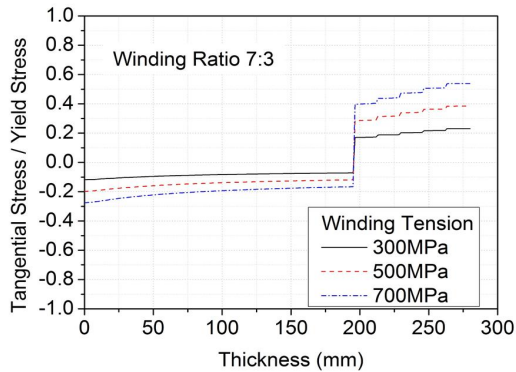
반경방향 응력의 경우 와인딩 장력이 증가함에 따라 실린더와 와인딩 영역에서의 응력 값이 증가하며 실린더의 비율이 증가할수록 와인딩에 따른 효과는 공통적으로 감소하는 경향을 보여준다. 반경방향 응력의 크기는 와인딩 비율보다 와인딩 장력의 영향을 더 크게 받는 것으로 확인된다.

접선방향 응력분포는 초기 실린더의 압축 응력의 크기를 결정하는 중요한 요소이다. 접선방향 응력의 크기는 와인딩 비율의 감소, 와인딩 장력의 증가에 따라 커진다. 반경방향 응력과 달리 와인딩 비율과 장력의 영향을 크게 받는 응력으로 설계 및 사용 목적에 따라 적절한 와인딩 비율과 와인딩 장력의 크기를 결정해야 할 필요가 있다.

와인딩 비율이 3:7이상의 경우 전체 해석 case에서 항복 강도 이내의 값을 보여주고 있어 응력측면에서는 만족할 만한 결과를 보여준다. 그러나 항복



(a) Winding ratio = 3:7



(b) Winding ratio = 7:3

Fig. 9 Radial Stress distribution with changes of winding tension

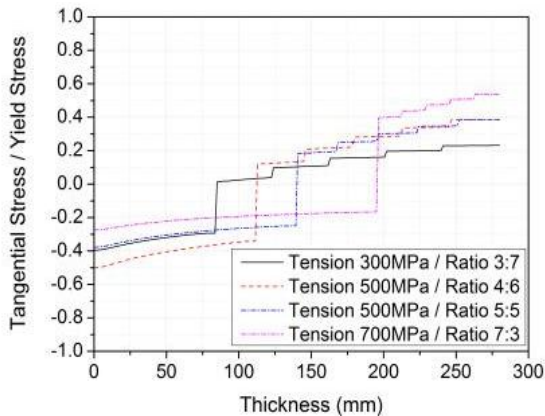


Fig. 10 Selectable winding ratio and winding tension when designing pressure vessel

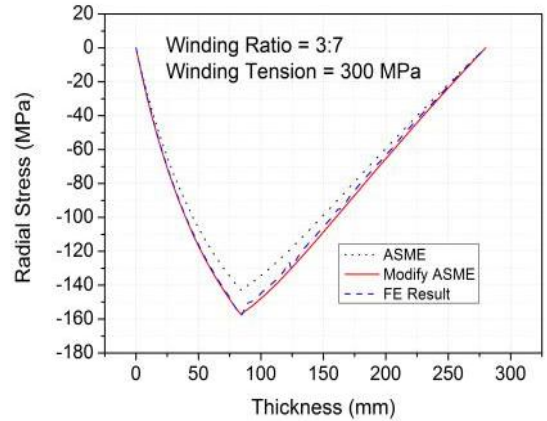


Fig. 11 Comparison of modified design formula with ASME code and FE results

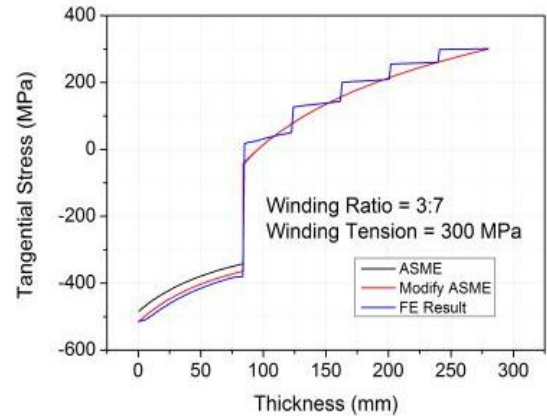


Fig. 12 Comparison of modified design formula with ASME code and FE results

강도와 유사한 초기응력은 매우 낮은 피로수명을 가지기에 700MPa급 용기에 적합한 설계는 Fig. 10 과 같이 초기 응력은 제품의 항복강도의 50%를 넘지 않는 선에서 선택하는 것이 적당할 것으로 판단된다. 와인딩 비율과 와인딩 장력의 관계는 반비례하여 와인딩 비율이 증가할수록 와인딩 장력은 감소해야 한다. 유한요소 해석과 ASME 설계식 기준으로 와인딩 장력과 와인딩 비율의 우선순위는 판단하기 어려우며 이는 용기를 제작하는데 소요되는 비용을 기준으로 설계자가 결정하여야 할 문제이다.

3. ASME 설계식 수정

ASME code에 제시된 식과 유한요소 해석결과는 Fig. 6, 7에 나타낸바와 같이 와인딩 비율이 증가할 수록 해석과 이론식의 차이가 증가한다. 설계된 압력용기의 정확한 응력값을 예측하기 위하여 ASME의 설계식을 아래의 수식 (7)~(10)과 같이 수정하였고 수정하여 계산한 결과를 Fig. 11, 12에 나타내었다.

$$x_r = \frac{(D_w - D_i)}{(D_o - D_i)} \quad (6)$$

$$\sigma_r(x_1) = \left[1.118 \exp\left(-\left(\frac{x_r + 0.012}{2.48}\right)^2\right) \right] \times \sigma_r(x_1) \quad (7)$$

$$\sigma_r(x_2) = \left[1.118 \exp\left(-\left(\frac{x_r + 0.012}{2.48}\right)^2\right) \right] \times \sigma_r(x_2) \quad (8)$$

$$\sigma_t(x_1) = (0.116x_r^{-0.4528} + 0.8638) \times \sigma_t(x_1) \quad (9)$$

$$\sigma_t(x_2) = \sigma_t(x_2) \quad (10)$$

4. 결 론

본 논문은 700MPa-100L급 초고압살균 설비용 압력용기를 개발하기 위한 기초 연구를 수행하였고 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. ASME Section VIII division 3에 제시 되어 있는 와이어 와인딩 식은 와인딩 비율이 70% 이상에서 적용이 가능하다.
2. 와이어 와인딩 기법을 활용한 설계에 있어 중요한 응력은 접선방향 응력이며, 접선방향 응력은 와인딩 비율과 와인딩 장력의 영향을 크게 받는다.
3. 항복 강도의 50%이하로 초기 응력을 발생시키는 경우 와인딩 비율과 와인딩 장력의 다양한 조합이 가능하며, 제작시 소요 되는 비용에 따라 적절하게 선택하는 것이 가능할 것으로 사료 된다.

후 기

“이 논문은 2018년도 산업통상자원부 연구비

지원(과제번호 : 10067122)에 의해 수행되었으며 이에 관계자 여러분께 감사드립니다.”

REFERENCES

1. San Martin, M. F., Barbosa-Canovas, G. V., Swanson, B. G., “Food Processing by High Hydrostatic Pressure” Critical Reviews in Food Science and Nutrition, Vol, 42, No. 6, pp. 627-645, 2002.
2. Mertens, B., “Hydrostatic pressure treatment of food: equipment and processing” New Methods of Food Preservation, pp 135-158, 1995.
3. Cho, S. M., Lee, S. K., Moon, J. S., Lyu, S. K., “Development of Subminiature Type 3 Composite Pressure Vessel for Cooling Unit in Electric Appliances,” Journal of the Korean Society of Manufacturing Process Engineers, Vol. 17, No. 6, pp.151-157, 2018.
4. Cho, S. M., Lee, S. K., Moon, J. S., Lyu, S. K., “Development of Type 4 Composite Pressure Vessel by using PET Liner for Self-contained Breathing Apparatus,” Journal of the Korean Society of Manufacturing Process Engineers, Vol. 17, No. 5, pp.164-169, 2018.
5. Cho, S. M., Kim, K. S., Cho, M. S., Lee, S. K., Lee, S. K., Lyu, S. K., “A Study on Failure Modes of Type 4 Composite Pressure Cylinders according to Shape of Domes,” Journal of the Korean Society of Manufacturing Process Engineers, Vol. 16, No. 5, pp.13-18, 2017
6. Alegre, J. M., Bravo, P. M., Preciado, M., “Fatigue behaviour of an autofrettaged high-pressure vessel for the food industry” Engineering Failure Analysis, Vol 14, No. 2, pp. 396~407, 2007.
7. Antonio Torres, J., Velazquez, G., “Commercial opportunities and research challenges in the high pressure processing of foods”, Journal of food engineering, Vol. 67, No. 1-2, pp. 95~112, 2005.
8. ASME, “ASME Boiler and Pressure Vessel Code,

Section VIII, Division 3: Alternative Rules for Construction of High Pressure Vessels”, 2007

9. Alegre, J. M., Bravo, P., Preciado, M., Solaguren-Beascoa, M., “Simulation procedure of high pressure vessels using the wire winding technique”, Engineering Failure Analysis, Vol. 17, No. 1, pp. 61~69, 2010.