

〈 기술논문 〉

임계좌굴하중을 고려한 원통형 용기 내부 벽면 보강격자의 위상최적설계

서유덕[†] · 윤성기^{*} · 연정흠^{**} · 장수영^{**} · 유준태^{***}

(2004년 10월 22일 접수, 2005년 1월 10일 심사완료)

Topology Optimization of Inner-Wall Stiffener for Critical Buckling Loads of Cylindrical Containers

Yu-Deok Seo, Sung-Kie Youn, Jeoung-Heum Yeon, Su-Young Chang and Joon-Tae Yoo

Key Words : Topology Optimization(위상최적설계), Critical Buckling Loads(임계좌굴하중), Cylindrical Containers(원통형 용기)

Abstract

In this paper, the topology optimization of inner-wall stiffener of cylindrical containers for the use as a rocket fuel tank is presented. Such structures for space mission should have high stiffness against the buckling while their weight should be maintained low from the viewpoint of cost and performance. Therefore, in the present work the reciprocal of critical buckling load is adopted as an objective function and the total mass of stiffener is constrained to a prescribed value. Due to the restriction of computational resources a section of cylindrical container is topologically optimized and this result is repeated to obtain the full design. Also, for manufacturability the concept of periodic topology pattern in design domain is newly introduced. In the numerical examples, the results by the proposed approach are investigated and compared with those of isogrid design.

기호설명

K_B	: 강성행렬
K_A	: 기하강성행렬
λ_i	: i 번째 고유치
ϕ_i	: i 번째 고유벡터
ρ_0	: 재료의 밀도물성치
x_e	: e 번째 설계변수
M_0	: 보강재의 질량제한
Ω_e	: e 번째 요소의 부피
u	: 변위 벡터
v	: 수반방정식의 해

E	: 유효탄성계수
E_0	: 재료의 탄성계수
ρ	: 밀도
α	: 설계자 정의 상수

1. 서 론

우주·비행용 구조물의 설계 시 구조물의 성능 증대와 비용절감을 위해 구조 안정성 뿐 아니라 경량화가 반드시 고려되어야 한다. 원통형 용기 (cylindrical container) 형상인 로켓 연료탱크의 경우에도 구조 안정성 및 경량화를 고려한 설계가 필수적이다. 로켓 연료탱크의 경우 발사 시의 압축하중에 의한 좌굴(buckling)에 매우 취약하므로 구조 안정성을 위한 좌굴 강성의 보장이 필요하다.

경량화와 구조 안정성 보장을 위해 원통형 용기의 얇은 외벽의 내부에 보강격자(stiffener)를 설

† 책임저자, 회원, 한국과학기술원 기계공학과

E-mail : imop@kaist.ac.kr

TEL : (042) 869-3074 FAX : (042)869-3210

* 회원, 한국과학기술원 기계공학과

** 한국과학기술원 기계공학과

*** 한국항공우주연구원 구조그룹

제하는 것이 유용하게 사용되고 있다. 주로 삼각형 격자(isogrid)와 사각형 격자(waffle-grid)의 보강이 성공적으로 적용되어 왔다. 특히 삼각형 격자는 등방성(isotropic) 거동을 하는 보강격자로서 많은 구조물의 보강재로 적용되어 왔다. 이처럼 기존의 보강격자가 성공적으로 적용되어 왔으나, 최적설계기법을 이용하면 경량화 및 좌굴 강성 증가에 더욱 효율적인 새로운 보강격자구조를 얻을 수 있을 것으로 판단된다.

구조물의 최적설계방법은 크게 형상(shape)최적설계, 치수(size)최적설계, 위상(topology)최적설계로 나눌 수 있다. 형상·치수 최적설계는 초기에 주어진 위상에 의존할 수 밖에 없는 반면, 위상 최적설계는 설계자의 경험에 의존하지 않고 자유로운 위상변화를 고려한 효과적인 설계가 가능한 장점이 있다.

본 논문에서는 위상최적설계 기법을 적용하여 무게를 유지하면서 임계좌굴하중을 증가시킬 수 있는 원통형 용기 내부 벽면 보강격자의 설계를 수행하였다.

논문의 구성은 다음과 같다. 2 장에서는 임계좌굴하중 해석을 기술하였고, 3 장에서는 위상최적설계 기법의 이론과 수식화를 기술하였다. 4 장에서는 반복패턴 개념을 설명하였고, 5 장에서는 원통형 용기의 위상최적설계 결과에 대해 기술하였으며 6 장에서 결론을 기술하였다.

2. 임계좌굴하중 해석

2.1 임계좌굴하중 해석 수식화

본 논문에서는 선형 임계좌굴하중 해석을 수행하였다. 선형 임계좌굴하중 해석은 식 (1)과 같이 고유치문제로 수식화 할 수 있다.⁽¹⁾

$$([K_B] + \lambda [K_A])\{\phi\} = \{0\} \quad (1)$$

여기서 K_B 는 강성 행렬(stiffness matrix)이고 K_A 는 기하강성 행렬(geometric stiffness matrix)이다. 고유치 λ 가 좌굴하중이며 고유벡터 ϕ 가 좌굴모드이다.

2.2 원통형 용기의 임계좌굴하중 해석

이 절에서는 본 논문의 설계 대상인 원통형 용기의 임계좌굴하중 해석을 수행하여 해석결과의 타당성을 검증하였다. 원통형 용기의 좌굴에 대해서는 이론적 연구와 실험이 활발히 수행되어 왔다.⁽²⁻⁴⁾ 원통형 용기의 좌굴모드는 원통형 용기의 길이에 따라 달라지게 되는데 로켓 연료탱크와 유사한 직경과 길이를 가지는 원통형 용기는 축 방향과 원주 방향으로 사인(sine)곡선 형태의

좌굴모드가 나타나는 것으로 알려져 있다.

본 논문에서는 Fig. 1 과 같은 원통형 용기의 임계좌굴하중 해석을 수행하였다. 원통형 용기의 두께는 $0.01m$, 반경은 $0.5m$ 이며 길이를 $1m$, $2m$, $3m$ 로 변화시켜가면서 임계좌굴하중 해석을 수행하였다. 원통형 용기의 아랫면을 고정하고 윗면은 축 방향 변위를 허용하였으며 윗면에 균일한 분포하중이 가해지고 있다. 재료의 탄성계수는 $70GPa$, 포화송 비는 0.3 이다. Table 1 에서는 임계좌굴하중 해석결과와 실험결과를 비교하였고 Fig. 2 는 길이에 따른 좌굴모드를 나타낸 것이다. Table 1 에서 보듯이 해석과 실험에서 매우 유사한 임계좌굴하중을 얻을 수 있었고 길이가 길어질수록 임계좌굴하중이 작아지는 경향을 보이고 있다. 또한 길이가 길어질수록 해석과 실험결과가 더 유사하게 나타났다. Fig. 2 에서 보듯이 원통형 용기의 축 방향과 원주 방향으로 사인곡선 형태의 좌굴모드가 나타났고 이는 실험의 좌굴모드와 매우 유사한 결과이다.

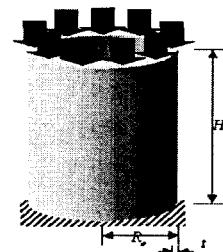


Fig. 1 Problem definition of cylindrical container

Table 1 The critical buckling loads of cylindrical containers

H	Analysis	Experiment
1 m	25.75 MN	29.68 MN
2 m	25.51 MN	25.29 MN
3 m	25.28 MN	24.19 MN

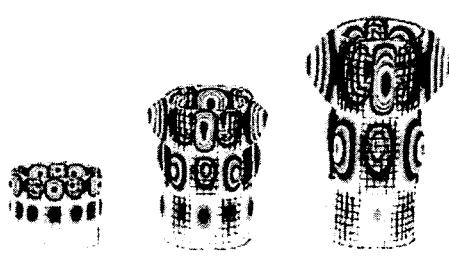


Fig. 2 Critical buckling modes of cylindrical containers
(a) H : 1m (b) H : 2m (c) H : 3m

3. 위상최적설계 기법

3.1 기본이론

위상 최적화 방법은 구조물의 잠재 존재 영역을 설계 영역으로 정의하고, 이를 많은 수의 요소(element)로 나눈 후, 최적의 재료 분포를 구하는 방법으로 Bendsoe 와 Kikuchi⁽⁵⁾가 연속체 구조물의 위상 최적화를 처음 시도한 후, 다양한 분야의 설계에서 성공적으로 적용되어지고 있다.^(6,7)

위상최적화방법에서는 구조물의 형상을 표현하기 위해서 아래의 식 (2)와 같이 설계영역 내의 각 요소에서의 재료존재유무를 표현하는 지시함수를 사용한다.

$$X(x_e) = \begin{cases} 1 & \text{if } x_e \in \Omega_m \\ 0 & \text{if } x_e \notin \Omega_m \end{cases} \quad (2)$$

여기서 x_e 는 e 번째 설계변수이고 Ω_m 는 재료 존재영역이다. 즉, 요소에 재료가 존재하면 요소의 지시함수는 1로 표현되고 재료가 존재하지 않으면 0으로 표현된다. 식 (2)와 같이 0과 1의 값만 가지는 이산화문제로 수식화 할 경우 최적화 과정에서 수렴성이 보장되지 않으므로 0과 1 사이의 임의의 값을 가질 수 있도록 지시함수를 연속함수로 완화하여 사용한다. 최적화 과정 중 설계 변수 값과 구조물의 거동을 연관짓기 위해 재료의 물성치와 완화된 지시함수 값을 물리적 타당한 범위 내에서 임의로 연관짓는 방법을 이용할 수 있다. 본 논문에서는 아래의 식 (3)에서처럼 0과 1 사이의 중간 값의 밀도를 가질 때 선형에 비해 현저히 낮은 물성치를 갖도록 벌칙을 가하여 중간 값의 밀도가 발생하는 것을 억제하였다.⁽⁸⁾

$$\frac{E}{E_0} = \frac{x_e}{1 + \alpha(1 - x_e)} \quad (3)$$

여기서 E 는 유효탄성계수, E_0 는 재료의 탄성계수이고 α 는 설계자 정의 상수로 20이 사용되었다.

3.2 최적화 수식화 및 알고리즘

본 논문에서 목적함수는 임계좌굴하중 증가를 위해 고유치의 역수를 택하였고 제한조건은 경량화를 위해 보강재의 질량을 택하였다.

$$\text{Minimize } f = \frac{1}{\lambda_1} \quad (4)$$

$$\text{subject to } h = \int_{\Omega} \rho d\Omega - M_0 = \sum_{e=1}^{nelem} \rho_0 x_e \Omega_e - M_0 \leq 0$$

여기서 λ_1 은 첫 번째 고유치, Ω 는 설계영역, ρ 는

밀도, M_0 는 질량 제한, ρ_0 는 재료의 밀도 물성치, x_e 는 e 번째 설계변수, Ω_e 는 e 번째 요소의 부피이다. 목적함수와 제한조건의 민감도는 아래의 식 (5)와 같이 표현할 수 있다.

$$\frac{df}{dx_e} = -\frac{1}{\lambda_1} \frac{d\lambda_1}{dx_e}, \quad \frac{dh}{dx_e} = \rho_0 \Omega_e \quad (5)$$

한편, 고유치 문제의 특성방정식으로부터 첫 번째 고유치의 민감도는 식 (6)와 같이 구해낼 수 있다.

$$\begin{aligned} \frac{d\lambda_1}{dx_e} &= \phi_1^T \left(\frac{dK_B}{dx_e} + \lambda_1 \frac{dK}{dx_e} \right) \phi_1 \\ &= \phi_1^T \left(\frac{\partial K_B}{\partial x_e} + \lambda_1 \frac{\partial K}{\partial x_e} \right) \phi_1 + \lambda_1 \phi_1^T \frac{\partial K}{\partial u} \frac{\partial u}{\partial x_e} \phi_1 \\ &= \phi_1^T \left(\frac{\partial K_B}{\partial x_e} + \lambda_1 \frac{\partial K}{\partial x_e} \right) \phi_1 - \lambda_1 \phi_1^T \frac{\partial K}{\partial u} \phi_1 K_B^{-1} \frac{\partial K_B}{\partial x_e} u \\ &= \phi_1^T \left(\frac{\partial K_B}{\partial x_e} + \lambda_1 \frac{\partial K}{\partial x_e} \right) \phi_1 - \lambda_1 v^T \frac{\partial K_B}{\partial x_e} u \end{aligned} \quad (6)$$

여기서 v 는 아래의 수반방정식 (7)을 만족하는 해이다.⁽⁹⁾

$$K_B v = \phi_1^T \frac{\partial K}{\partial x_e} \phi_1 \quad (7)$$

식 (6)을 통해 구한 첫 번째 고유치의 민감도를 이용하여 목적함수의 민감도를 계산할 수 있다.

본 논문에서는 최적화 알고리즘으로 설계변수가 많고 제한조건이 비교적 간단한 위상최적설계문제의 특성과 잘 부합되는 최적조건법(optimality criteria method)을 사용하였다.

4. 반복패턴

이 장에서는 위상최적설계 결과의 제작 용이성 향상을 위해 본 논문에서 도입한 반복패턴의 개념을 설명하였다.

반복패턴이란 설계영역의 일부 요소의 밀도만 설계변수로 정하고 설계변수가 아닌 설계영역은 설계변수와 같은 밀도를 가지는 대응요소로 구성된다고 가정하여 결과적으로 같은 형상이 반복적으로 나타나도록 하는 것을 의미한다. 다음 장의 Fig. 3은 임의의 설계영역을 나타낸 것이다. 여기서 좌측 하단부에 표시된 요소들의 밀도만을 설계변수로 선택하고 같은 문자로 표시된 요소들은 각각 대응되는 설계변수와 같은 밀도를 가정하여 반복적인 형상이 나타나도록 하였다. 반복패턴은 수직 방향으로 반복적으로 나타나며 수평 방향으로

는 대칭성을 고려하여 대칭으로 나타나게 하였다. 한편, 반복패턴을 적용할 경우 아래의 식 (8)과 같이 강성행렬과 기하강성행렬의 민감도 계산의 변화가 요구된다.

$$\frac{\partial K_B}{\partial x_j} = \sum_{i=1}^p \frac{\partial K_B}{\partial \rho_{ij}}, \quad \frac{\partial K}{\partial x_j} = \sum_{i=1}^p \frac{\partial K}{\partial \rho_{ij}} \quad (8)$$

여기서 p 는 반복패턴의 개수이고 ρ_{ij} 는 i 번째 패턴의 j 번째 요소의 밀도이다. 즉, j 번째 설계변수의 민감도는 각 패턴의 j 번째 요소의 민감도의 합으로 표현된다.

5. 원통형 용기 내부벽면 위상최적설계

이 장에서는 원통형 용기 내부 벽면 보강격자의 위상최적설계를 수행하였다. 외벽과 보강격자의 두께비가 다른 3 가지의 설계대상을 최적설계하고 그 결과를 기준 설계 방법인 삼각형 격자 설계의 결과와 비교하였다. 각 예제의 두께비율은 1:1, 1:1.7, 1:4.3 이다. 첫 번째 예제는 실용적인 대상을 설계하기기에 앞서 선형적으로 연구한 예제이다. 이 예제는 부분 모델의 선정 기준을 결정하고 반복패턴과 질량제한조건에 따른 설계결과를 살펴보기 위해 연구하였으며 두께비율은 본 저자가 결정한 값이다. 그리고 두 번째 예제와 세 번째 예제는 실용적인 대상에 최적설계를 적용한 결과이다. 두 번째 예제에서는 기존의 삼각형 격자구조로 제작된 연료탱크를 설계하였고 세 번째 예제에서는 현재 개발중인 KSLV 연료탱크의 보강격자를 설계하였다. 두 번째와 세 번째 예제의 두께비율은 삼각형 격자구조의 두께비율에 근거하여 결정하였다.

5.1 예제 1: 외벽과 보강격자의 두께비율 - 1:1

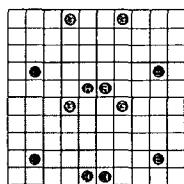


Fig. 3 Periodic pattern

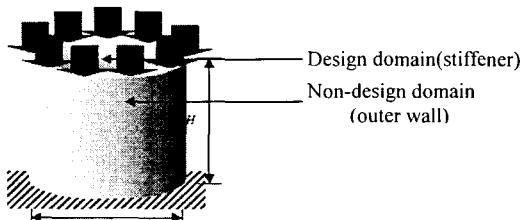


Fig. 4 The design objective of example 1

5.1.1 문제점의

예제 1의 설계대상은 Fig. 4 와 같다. 여기서 원통형 용기의 직경은 1m, 높이는 1m, 외벽의 두께는 5mm, 내벽 보강격자의 두께는 5mm 이다. 원통형 용기의 외벽은 비설계영역이고 내벽이 설계영역이다. 원통형 용기의 아래면은 고정되어 있고 윗면은 축 방향 변위만을 허용하였다. 그리고 윗면에 균일한 분포하중이 가해지고 있다. 재료의 탄성계수는 70GPa, 포화송 비는 0.3, 재료의 밀도 물성치는 2700kg/m³ 이다.

5.1.2 최적설계적용

원통형 용기 전체모델을 설계대상으로 위상최적설계 할 경우 컴퓨터의 기억용량이 매우 부족하고 막대한 계산시간이 요구되어 현실적인 적용에 제약이 따른다. 따라서 본 논문에서는 원통형 용기의 원주 방향으로 부분 모델(section model)을 선택하여 그 부분 모델의 위상최적설계를 수행하고 이 결과를 이용하여 원통형 용기 전체 모델을 구성하는 방법을 택하였다. 부분 모델은 원통형 용기 좌굴모드의 사인곡선 주기성을 고려하여 선택하였다. 원통형 용기의 원주방향의 좌굴모드를 살펴보면 Fig. 5 와 같다. Fig. 5 에서 보듯이 원통형 용기의 원주 방향 좌굴모드는 7 주기의 사인곡선형태로 나타났다. 따라서 사인곡선형태의 좌굴모드를 표현할 수 있는 최소 단위인 사인곡선의 반주기에 해당되는 1/14 모델을 부분 모델로 선택하고 위상최적설계를 수행하였다. 또 2 개, 5 개, 10 개의 축 방향 반복패턴을 적용하였다.

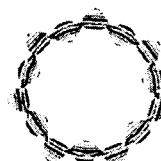


Fig. 5 The buckling mode of cylindrical container

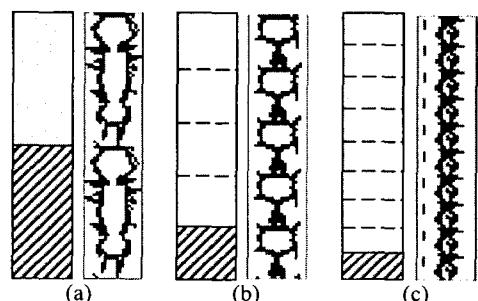


Fig. 6 The optimized section models (Case 1); (a) Two patterns (b) Five patterns (c) Ten patterns

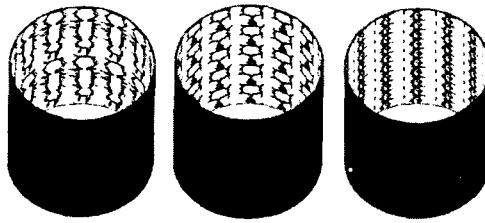


Fig. 7 The stiffener shapes of the cylindrical containers

Table 2 The critical buckling loads of the cylindrical containers (Case 1)

Periodic pattern cases	The critical buckling loads
Two vertical patterns	9.262 MN
Five vertical patterns	9.173 MN
Ten vertical patterns	8.119 MN

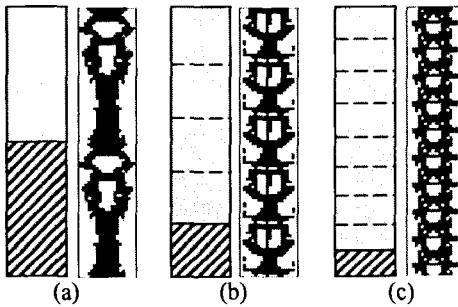


Fig. 8 The optimized section models (Case 2); (a) Two patterns (b) Five patterns (c) Ten patterns

5.1.2.1 경우 1: 30% 질량제한조건

이 예제에서는 보강격자의 질량이 내부 벽면의 전체 질량의 30%가 되도록 질량제한조건을 적용하였다. 각 반복패턴의 경우에 따른 부분 모델의 위상최적설계결과는 Fig. 6에 나타나있다. Fig. 6에서 각각의 왼쪽 그림은 초기상태의 밀도 분포를 나타내며 빛금 친 영역이 설계변수를 포함하고 있다. 그리고 설계영역에는 같은 보강재 형상이 축 방향으로 반복되어 나타난다. 부분 모델 최적설계 결과를 이용하여 원통형 용기 전체 모델을 구성하면 Fig. 7과 같고 임계좌굴하중 해석결과는 Table 2에 나타나 있다. Table 2에서 보듯이 2 개의 축 방향 반복패턴을 적용한 경우의 임계좌굴하중이 가장 크게 나타났다.

5.1.2.2 경우 2: 50% 질량제한조건

다음으로 50% 질량제한조건을 적용하여 위상최적설계를 수행하였다. 각 반복패턴에 따른 부분 모델의 최적설계 결과는 Fig. 8과 같고 이 결과를 이용하여 원통형 용기 전체 모델을 구성하면 Fig.

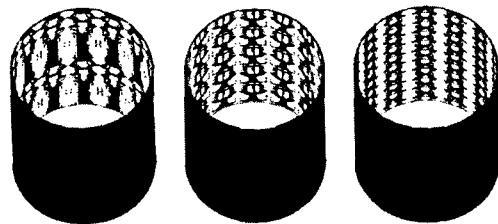


Fig. 9 The stiffener shapes of the cylindrical containers

Table 3 The critical buckling loads of the cylindrical containers (Case 2)

Periodic pattern cases	The critical buckling loads
Two vertical patterns	10.182 MN
Five vertical patterns	11.541 MN
Ten vertical patterns	10.949 MN

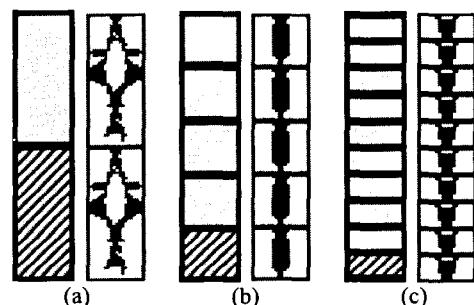


Fig. 10 The optimized section models (Case 3); Two patterns (b) Five patterns (c) Ten patterns

9와 같다. Table 3에서 보듯이 5 개의 축 방향 반복패턴을 적용한 경우의 임계좌굴하중이 가장 크게 나타났다.

5.1.2.3 경우 3: 반복패턴의 경계를 비설계영역으로 가정, 30% 질량제한조건

위의 결과에서 보듯이 제작 용이성 향상을 위해 도입한 반복패턴을 적용했음에도 불구하고 매우 복잡한 보강재 형상을 얻었다. 따라서 이 예제에서는 제작 용이성을 보다 향상시키기 위해 각 반복패턴의 경계를 비설계영역으로 가정하고 설계영역의 30% 질량제한조건을 적용하여 최적화를 수행하였다. Fig. 10에서 각각의 왼쪽 그림은 초기상태의 밀도분포를 나타낸 것이다. 그림에서 보듯이 반복패턴의 경계들을 비설계영역으로 가정하였다. 각각의 오른쪽 그림은 부분 모델의 최적설계결과이며 5 개와 10 개의 축 방향 반복패턴을 적용한 경우 매우 단순한 보강재 형상을 얻을 수 있었다. 부분 모델의 설계결과를 이용하여 원통형 용기 전

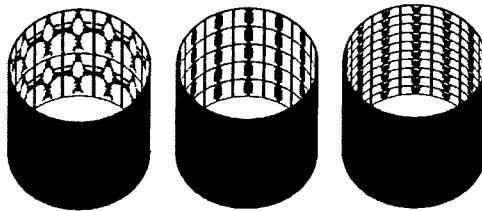


Fig. 11 The stiffener shapes of the cylindrical containers

Table 4 The critical buckling loads of the cylindrical containers (Case 3)

Periodic pattern cases (Mass ratio of stiffener)	The critical buckling loads (MN)
Two vertical patterns (39.5%)	10.683
Five vertical patterns (43.3%)	10.803
Ten vertical patterns (49.6%)	12.010

Table 5 Comparison with isogrid design : example 1

Total mass ratio of stiffener(%)	Isogrid design (MN)	Topology optimization(MN)
30	9.171	9.262
39.5	10.269	10.683
43.3	10.542	10.806
50	11.107	12.010

체 모델을 구성하면 Fig. 11 과 같으며 각 결과의 임계좌굴하중은 Table 4 에 나타나있다. 설계영역의 30% 질량제한조건을 적용하였기 때문에 각 결과들의 총 보강재 질량비는 2 개의 반복패턴을 적용한 경우에 39.5%, 5 개의 경우는 43.3%, 10 개의 경우는 49.6%이다.

5.1.3 삼각형 격자 설계와의 비교

앞의 예제에서 원통형 용기 내부 벽면 보강격자의 위상최적설계를 수행하였다. 설계 결과들의 유용성을 입증하기 위해서는 기존의 설계 방법인 삼각형 격자 설계와 비교하여야 한다. 삼각형 격자 구조는 원통형 용기 내벽 보강격자구조로 성공적으로 적용되어 왔고 등방성 거동을 보이며 등가모델을 통해 매우 간단하게 해석을 수행할 수 있는 장점을 가지고 있다.⁽¹⁰⁾ 본 논문에서도 삼각형 격자 설계의 등가모델을 이용하여 설계결과와 비교하였다. Table 5 에 삼각형 격자 설계와 위상최적설계의 임계좌굴하중을 비교하였다. 표에서 보면 위

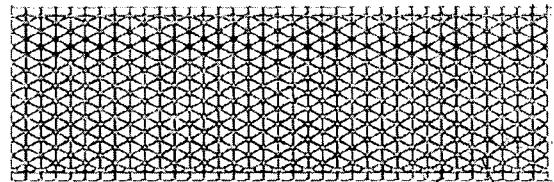
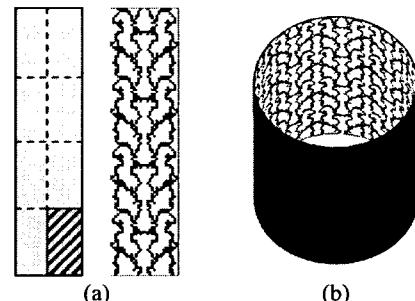


Fig. 12 The design objective of example 2

Fig. 13 The optimized results of example 2
(a) The section model
(b) The cylindrical container

상최적설계 결과의 임계좌굴하중이 삼각형 격자 설계의 임계좌굴하중보다 크게 나타남을 확인할 수 있으나 단지 수 퍼센트(%)만 증가하는 것으로 나타났다. 이는 외벽과 보강재의 두께를 같게 하여 보강재에 의한 보강 효과가 미비하기 때문이다.

5.2 예제 2: 외벽과 보강격자의 두께비율 - 1:1.7

5.2.1 문제점의

이 예제의 설계대상은 삼각형 격자로 설계된 원통형 용기 실험 시편이고 Fig. 12 는 설계대상의 평면도를 나타낸 것이다. 원통형 용기의 직경은 1m, 높이는 1.2m, 외벽의 두께는 1.9mm, 보강격자의 두께는 3.18mm 이다. 예제 1 과 같은 경계 및 하중 조건이 적용되었고 재료는 Al2219 이며 보강격자의 질량비는 28.3%이다.

5.2.2 최적설계적용 및 실험시편과의 비교

원통형 용기의 좌굴모드가 10 주기의 사인곡선 형태로 나타났기 때문에 사인곡선의 한 주기에 해당하는 36°모델을 부분 모델로 선택하였다. 28% 질량제한조건이 적용되었다. 사인곡선의 한 주기에 해당하는 부분 모델을 선택하였으므로 대칭성을 고려하여 원주 방향으로 2 개, 축 방향으로 4 개의 반복패턴을 적용하였다. Fig. 13(a)의 원쪽 그림은 초기 상태를 나타낸 것이며 오른쪽 그림은 부분 모델의 최적설계 결과이다. 부분 모델의 설계결과를 이용하여 원통형 용기 전체 모델을 구성하면 Fig. 13(b)와 같다.

전체 모델의 임계좌굴하중 해석 결과를 삼각형 격자 실험 시편의 실험 및 해석 결과와 비교하면 Table 6 과 같다. 표에서 보듯이 위상최적설계 결과의 임계좌굴하중이 삼각형 격자의 임계좌굴하중보다 약 34% 더 크게 나타났다.

5.3 예제 3: 외벽과 보강격자의 두께비율 - 1:4.3

5.3.1 문제정의

세 번째 예제의 설계 대상은 삼각형 격자로 설계된 로켓(rocket) 연료탱크의 70° 패널(panel) 시편이며 Fig. 14 는 설계대상의 평면도이다. 이는 현재 개발중인 KSLV 의 연료탱크다. 70° 패널 시편의 직경은 $2.4m$, 높이는 $0.662m$, 외벽의 두께는 $2.4mm$, 보강격자의 두께는 $10.3mm$ 이다. 이 예제에서 적용된 경계 및 하중 조건은 앞의 예제와 동일하고 사용된 재료는 Al2024이며 보강격자의 질량비는 17.1%이다.

5.3.2 최적설계적용 및 실험시편과의 비교

이 예제에서는 실험시편의 삼각형 격자 길이와 유사한 크기인 10° 모델을 부분 모델로 선택하였다. 17% 질량제한조건을 적용하였고 원주 방향으로 2 개, 축 방향으로 4 개의 반복패턴을 적용하였다. 두 가지 경우에 대해 최적설계를 수행하였는데 첫 번째 경우(Case 1)는 비설계영역을 가정하지 않은 경우이고 두 번째 경우(Case 2)는 몇 개의 요소를 비설계영역으로 가정한 경우이다. Fig. 15 에서 각 경우의 왼쪽 그림은 초기 상태를 나타내며 두 번째 경우의 초기 상태에서 보듯이 각 반복패턴의 몇 개의 요소를 비설계영역으로 가정하였다. 두 경우 모두 보강재의 질량비는 17%이다.

Table 6 Comparison with isogrid design : example 2

		The critical buckling loads (MN)	Increment (%)
Optimization		1.948	34.3
Isogrid design	Experiment	1.451	
	Analysis	1.397	-3.7

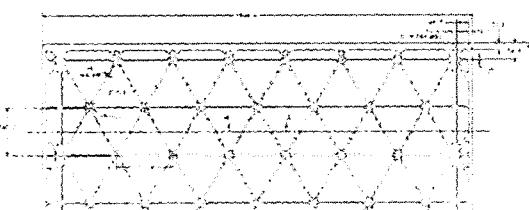


Fig. 14 The design objective of example 3

Fig. 15 에서 각 경우의 오른쪽 그림은 부분 모델의 최적설계 결과이고 이를 이용하여 70° 패널을 구성하면 Fig. 16 과 같다. 70° 패널의 임계좌굴하중 해석을 수행한 결과는 Table 7 과 같다. 위상최적설계 결과의 임계좌굴하중이 삼각형 격자 설계의 실험 임계좌굴하중보다 약 55~70%, 해석 임계좌굴하중보다 약 36~48% 크게 나타났으며 비교적 간단한 보강재 형상을 얻을 수 있었다.

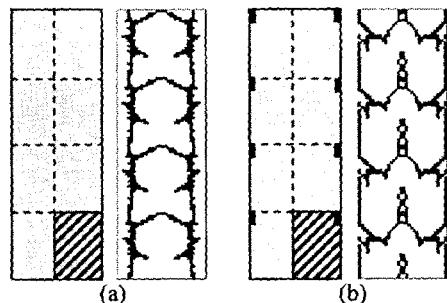


Fig. 15 The optimized section models ; (a) Case 1, (b) Case 2

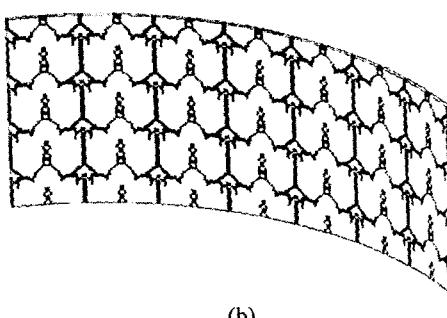
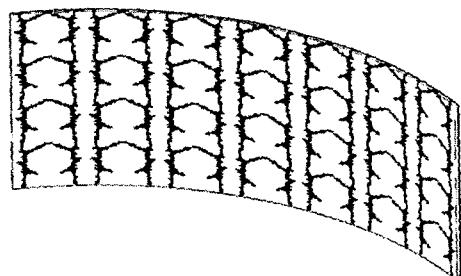


Fig. 16 The optimized 70° panels ; (a) Case 1, (b) Case 2

Table 7 Comparison with isogrid design : example 3

		The critical buckling loads (kN)	Increment (%)	
			Vs. Exp.	Vs. Ana.
Optimization	Case 1	902	55	36
	Case 2	980	69	48
Isogrid design	Exp.	581	-	-
	Ana.	664	-	-

6. 결 론

본 논문에서는 무게를 유지하면서 임계좌굴하중을 증가시킬 수 있는 원통형 용기 내부 벽면 보강격자의 위상최적설계를 수행하였다. 임계좌굴하중 해석을 고유치 문제로 수식화 하였고 실험 결과와 비교하여 해석의 정확성을 검증하였다. 좌굴강성을 증가시키기 위해 고유치의 역수를 목적함수로 채택하였고 보강재의 질량을 제한조건으로 정하였다. 설계 결과의 제작 용이성 향상을 위해 반복패턴의 개념을 제안하였다. 원통형 용기의 좌굴모드나 삼각형 격자 길이를 고려한 부분 모델을 채택하여 부분 모델의 위상최적설계를 수행하였고 이를 이용하여 전체 모델을 구성하였다. 기존 설계 방법인 삼각형 격자 설계와 비교하여 위상최적설계 결과의 유용성을 보였다.

후 기

본 논문은 한국항공우주연구원의 “소형위성 발사체(KSLV) 개발 사업”에 의해 지원되었음.

참고문헌

- (1) Yeon, J.-H., Chang, S.-Y., Seo, Y.-D., Youn, S.-K. and Yoo, J.-T., 2003, “A Study on the Topology Optimization of Propellant Tank Considering Critical Buckling Loads”, *The 4th Space Launch Vehicle Technique Symposium*, pp. 198~204.
- (2) Bruhn, E. F., 1973, *Analysis and Design of Flight Vehicle Structures*, S. R. Jacobs & Associated Inc.
- (3) Donnell, L. H., *Stability of Thin-Walled Tubes Under Torsion*, NACA Report 479.
- (4) Batdorf, S. B., 1947, *A Simplified Method of Elastic Stability Analysis for Thin Cylindrical Shells*, NACA Report 874.
- (5) Bendsoe, M. P. and Kikuchi, N., 1988, "Generating optimal topologies in structural design using a homogenization method", *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*, vol. 71, pp. 197~224.
- (6) Chang, S.-Y., Cho, J.-H., Youn, S.-K., Kim, C.-S. and Oh, D.-H., 2001, "Topology Optimization of a HDD Actuator Arm", *Computational Structural Engineering*, Vol. 1, No. 2, pp. 89~96.
- (7) Park, K.-S., Chang, S.-Y. and Youn, S.-K., 2003, "Topology Optimization of the Primary Mirror of a Multi-Spectral Camera", *Structural and Multi-disciplinary Optimization*, Vol. 25, No. 1, pp. 46~53.
- (8) Youn, S.-K. and Park, S.-H., 1997, "A Study of The Shape Extraction Process in The Structural Topology Optimization Using Homogenized Material", *Computers & Structures* Vol. 62, No. 3, pp. 527~538.
- (9) Bendsoe, M. P. and Sigmund, O., 2003, *Topology Optimization – Theory, Methods and Applications*, Springer-Verlag, Berlin Heidelberg.
- (10) Meyer, R. R., Harwood, O. P. and Orlando, J. I., 1973, *Isogrid design handbook*, NASA CR-124075.