

개화형상을 모사한 가항력 돛 수납최적화

김희경¹ · 정진원¹ · 이건희¹ · 이동윤¹ · 최준우¹ · 김병규^{1,†}¹한국항공대학교 항공우주 및 기계공학부

Optimization of Drag-sail Storage Inspired from Blossom Method

Heekyung Kim¹, Jinwon Jung¹, Gunhee Lee¹, Dongyun Lee¹, Junwoo Choi¹ and Byungkyu Kim^{1,†}¹Department of Aerospace and Mechanical Engineering, Korea Aerospace University

Abstract

In this paper, we propose a new folding method (the blossom method) to increase storage efficiency of drag-sail. To resolve the issue caused by increase in the thickness of the sail, we allowed margin space (offset) along the folding line and made holes at the intersection of offset lines to prevent distortion of film. In addition, to verify applicability of the blossom method, we fabricated quarter of the sail by using Mylar film and conducted a deployment experiment. If the blossom method is applied, storage ratio (storage volume: deployed area) is 1: 68.64, that is approximately 1.88 times more than the z-fold method of folding sailing.

초 록

본 논문에서는 drag-sail의 수납 효율을 높이기 위해 새로운 접기 방법인 blossom method를 제안하였다. 가항력 돛을 접을수록 두께가 늘어남에 따라 발생하는 문제점을 해결하기 위해 접히는 라인에 여유 공간 (offset)을 주고, offset 라인이 교차하는 지점에는 구멍을 뚫어 film의 일그러짐을 방지하였다. 또한, blossom method의 적용 가능성을 확인하기 위해 mylar film으로 제작하여 전개 실험을 수행하였다. Blossom method를 적용할 경우, 수납부피 대비 전개면적 비인 수납비는 1: 68.64로 기존의 가항력 돛 접기 방법인 z-fold method보다 약 1.88배 향상되었으며, 전개 실험 결과 구멍이나 jamming에 의한 손상이 없는 것을 확인하였다.

Key Words : Origami Method(접기 방식), Drag-sail(가항력 돛), De-orbit(궤도이탈), Offset Method(오프셋 방식), Folding Layer Numbering(접이층 번호지정), Deployment Test(전개 실험)

1. 서 론

1999년 UN 외기권 평화적 이용 위원회(COPUOS)는 우주잔해 증가로 인해 임무수명이 종료된 폐위성과의 충돌 위험성이 지속적으로 증가하고 있음을 경고하

며 우주잔해 제거의 필요성을 부각시켰다.

따라서 UN에서는 2007년 COPUOS 승인 아래 우주잔해 완화를 위한 지침을 발표하고, 우주잔해와 폐위성간의 충돌위험성을 미연에 방지하고자 다양한 방안을 제시하고 있다[1]. 대표적인 방안으로는 위성의 임무수명이 종료되면 궤도이탈을 위해 가항력 돛을 전개하여 대기권 내로 재진입시키는 완화방식(mitigation method)이 있다[2]. NASA, Surrey 우주센터 등에서는 이미 실제 위성에 적용하고 있으며[3-5], 유럽, 미

Received: May. 22, 2017 Revised: June. 22, 2017 Accepted: June. 23, 2017

† Corresponding Author

Tel: +82-2-300-0101, E-mail: bkim@kau.ac.kr

© The Society for Aerospace System Engineering

국 등 선진국에서는 추후 발사 예정인 위성들에 대해서는 가항력 돛과 같은 궤도이탈 장치를 반드시 장착할 것을 권고하고 있다.

본 논문에서는 개화형상을 모사한 새로운 가항력 돛 접기 방식을 제시하였다. 기존의 위성들에 탑재된 가항력 돛의 수납방식은 주로 z-fold 방식으로 접는 방법은 간단하지만, 수납효율을 높이기에는 한계가 있다 [6, 7]. 따라서, 제안된 가항력 돛 접기 방식은 수납효율을 극대화하는 것에 초점을 맞추었으며, 가항력 돛 제작 시 film 간의 간극을 줄이고 균일한 형상과 두께를 유지하도록 offset method를 적용하였다. 최종적으로 mylar film으로 제작하였으며, 전개실험을 통해 전개시간 및 가항력 돛의 손상여부를 확인하였다.

2. 본 론

2.1 개화형상 모사 가항력 돛 접기 방식

본 논문에서 제안된 접기 방식은 blossom method로 개화 형상을 모사하였으며, crease pattern은 Fig. 1과 같다.

Cream pattern을 1 회 적용할 경우 면적은 1/4 로 축소되며, Fig. 2에 보이는 것과 같이 crease pattern 적용 전/후의 형상이 동일하기 때문에 반복해서 적용이 가능하다는 장점을 가진다. 하지만 일정 횟수 이상을 반복할 경우, 면적이 축소되는 만큼 두께가 증가하기 때문에 가항력 돛의 전개 면적에 따른 최적의 반복 횟수를 선정하는 것이 중요하다.

2.2 수납효율 최적화를 위한 이론 해석

2.2.1 최적 반복횟수

Cream pattern 반복 횟수에 따른 이론적 부피는 항상 일정하므로 이론적 부피는 최적의 반복 횟수를 찾는 기준이 될 수 없다. 따라서 cream pattern 반복 횟수에 따라 높이와 면적 변화를 함께 고려할 수 있는 표면적 값을 척도로 사용하였다.

Cream pattern의 n 회 반복에 따른 한 변의 길이 l 과 두께 t 는 각각 Eq. 1, Eq. 2와 같이 정의된다.

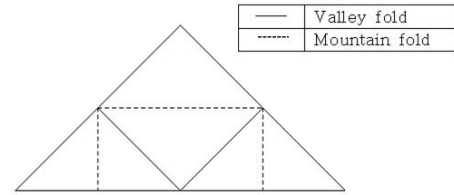


Fig. 1 Crease Pattern

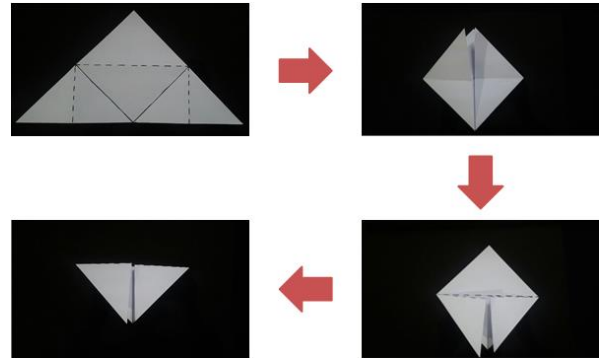


Fig. 2 1 Cycle Folding

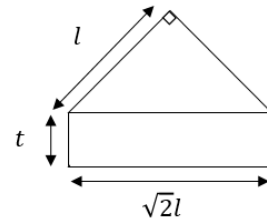


Fig. 3 Schematic Diagram for the Calculation of Surface Area

$$l = \frac{l_0}{2^n} \tag{1}$$

$$t = t_0 \times 4^n \tag{2}$$

이 때, l_0 는 전개상태 가항력 돛의 한 변의 길이고, t_0 는 가항력 돛에 사용된 film의 두께, n 은 반복 횟수이다.

가항력 돛을 완전히 접었을 때, Fig. 3과 같은 삼각기둥 형태가 되며, 삼각기둥 윗면의 넓이를 s_t , 이등변을 포함한 옆면의 넓이를 t_s , 빗변을 포함한 옆면의 넓이를 t_h 라고 할 때, n 회 반복하여 접을 경우 수납상태의 가항력 돛 표면적 s 는 Eq. 3과 같다.

$$\begin{aligned}
 s &= 2s_t + 2t_s + t_h \\
 &= \frac{l^2}{2} + \sqrt{2}lt + lt \quad (3)
 \end{aligned}$$

본 연구에서는 전개상태의 가항력 돛 한 변의 길이가 1500 mm, 두께가 0.0125 mm인 mylar film을 사용하였다. 위와 같은 초기 조건을 가질 경우의 crease pattern 반복 횟수에 따른 표면적 변화는 Fig. 4와 같으며, 반복 횟수가 증가할수록 표면적은 감소하다가 5회 반복 이후부터는 표면적이 다시 증가하는 것을 확인할 수 있다.

따라서 본 논문에서는 crease pattern을 5회 반복하여 적용하였다.

2.2.2 Offset method

Crease pattern을 4회 이상 반복할 경우 내측 film과 외측 film의 두께 차이로 인해 일그러짐 현상이 발생한다. 이를 해결하기 위한 방안으로 본 논문에서는 offset method를 적용하였다.

Offset method란 crease pattern으로 나뉜 최소단위의 삼각형을 cell이라고 명명할 경우, 접힌 상태의 내측/외측 두 cell 사이에 여유 공간(offset)을 두고 위치시켜 접었을 때 일정한 형상을 유지하면서 완전히 접쳐지도록 하는 방법이다 (Fig. 5).

2.2.3 Folding layer numbering

Offset method를 적용하기 위해서는 가항력 돛을 완전히 접었을 때 두 cell 사이에 존재하는 cell의 수를 알아야한다. 가항력 돛을 완전히 접은 상태에서 가장 아래에 위치하는 cell부터 순서대로 각 cell에 숫자를 매긴다. 이 숫자는 완전히 접었을 때 해당 cell의 위치이며, 내측/외측에 위치한 두 cell 사이의 거리를 의미한다.

Figure 6은 crease pattern을 2회 반복한 경우에 각 cell에 매겨진 숫자로, 가항력 돛의 꼭지점을 기준으로 좌우가 대칭인 형태이므로 좌측면만 표시하였다. 각 cell에 매겨진 숫자의 차이는 가항력 돛을 완전히 접었을 때 두 cell 사이에 존재하는 cell의 수를 의미하므로, offset의 크기를 알 수 있다.

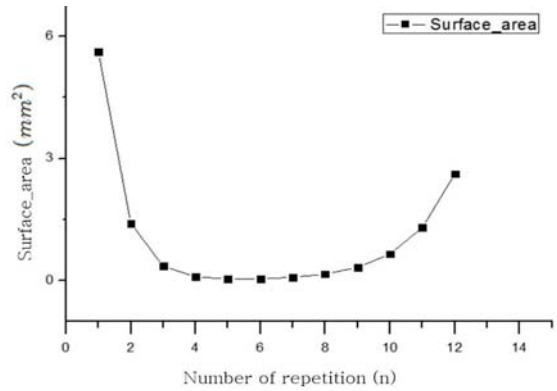


Fig. 4 Surface Area Depending on Cycle

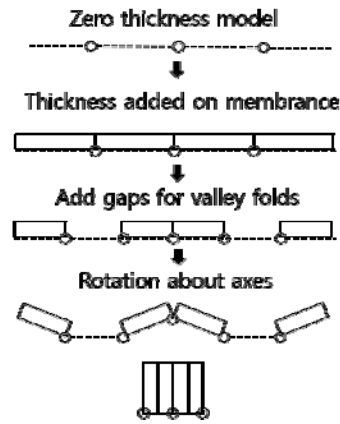


Fig. 5 Offset Method [8]

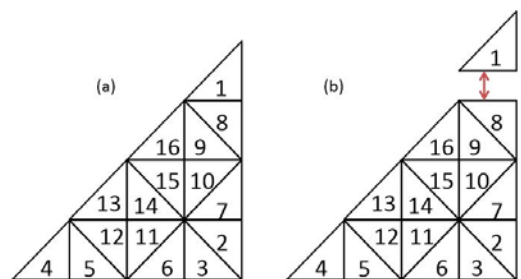


Fig. 6 (a) Layer Number of 2 Cycle (b) Applying Offset between Number Land 8

예를 들어, Fig. 6 (a)에서 1과 8은 각각 첫 번째와 8 번째에 있는 cell을 의미하며 이 두 cell 사이에는 완전히 접었을 때, 6 장의 cell이 들어감을 알 수 있다. 따라서 Fig. 6 (b)에 나타난 것처럼 두 cell 사이에 6 장의 cell 두께인 0.075 mm만큼의 offset이 필요하게 된다.

2.2.4 Layer numbering pattern

Crease pattern 반복 횟수가 1 회 늘어남에 따라 cell의 개수가 4 배씩 증가하여 5 회 반복 시 1024 개의 cell이 생성된다. 이 때, 반복 횟수에 따른 각 cell들의 번호는 일정한 규칙을 가지며, 규칙을 통하여 필요한 offset 크기를 계산할 수 있다. Cell의 형태는 좌/우 대칭이므로 좌 반면을 기준으로 설명하였다.

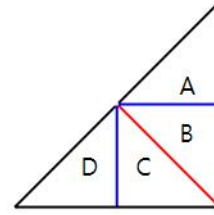


Fig. 7 Base Unit

Figure 7과 같이 한 번 접었을 때 생기는 4 개의 cell모양을 기본으로 하며, 이를 base unit cell이라고 한다. 가장 위의 cell부터 시계방향으로 A, B, C, D 구역으로 나눌 수 있다. Crease pattern 반복 시 기존에 존재하던 A, B, C, D 구역 안에 각각 다시 base unit cell 형태로 나눌 수 있으며, 3 회 반복 시 cell의 형태는 Fig. 8과 같다. Fig. 8의 굵은 선은 1 회 적용 시 나타나는 crease pattern이며, 2 회 반복할 경우 1 회 적용한 crease pattern 구역 안에서 다시 점선을 따라 동일한 방법으로 A, B, C, D 구역이 나뉜다.

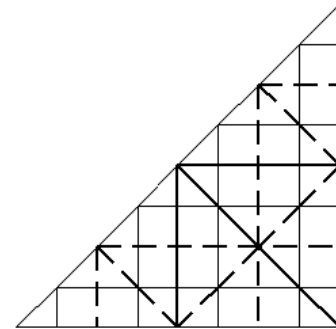


Fig. 8 3 Cycle

Figure 8에 나타낸 것과 같이 crease pattern을 1 회 적용한 A 구역과 D 구역의 모양은 동일하다. 하지만, 2 회 반복 시 base unit cell은 crease pattern을 1 회 적용한 A 구역과 D 구역 사이 선을 기준으로 대칭된다. Fig. 9와 같이 2 회 반복 시행에 따라 만들어진 base unit cell은 점선이 나타내는 이웃하는 두 base unit cell 사이의 선을 따라 대칭이다. Fig. 9에 표시된 동그라미는 2 회 반복 시 A 구역을 나타내며, 이는 base unit cell 점선을 따라 대칭으로, base unit cell의 형태가 동일하더라도 그 안의 각 구역은 달라짐을 알 수 있다.

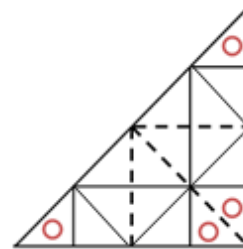


Fig. 9 Symmetry

숫자가 기입되는 순서는 crease pattern 1 회 적용 기준으로 만들어진 A, B, C, D 구역에 숫자가 1부터 순서대로 기입된다. 즉, 1 번은 1 회 적용 시 A 구역에, 2는 B 구역, 3은 C 구역, 4는 D 구역이다. 2 회 적용 시 숫자가 기입되는 순서는 1 회 반복 시 A, B, C, D, 구역 내에 같은 방식으로 각각 하나씩, 3 회 반복 시에는 2 회 반복 시 A', B', C', D' 구역 내에 차례로 기입된다. 1 번 cell이 있는 위치는 가장 큰 단위인 crease pattern을 1 회 적용한 굵은 선을 기준으로 A 구역에 있으며, A 구역 안에서 그 다음으로 큰 단위인 2 회 반복 점선을 따라 A' 구역, 3 회 반복 시 A'' 구역에 위치한다.

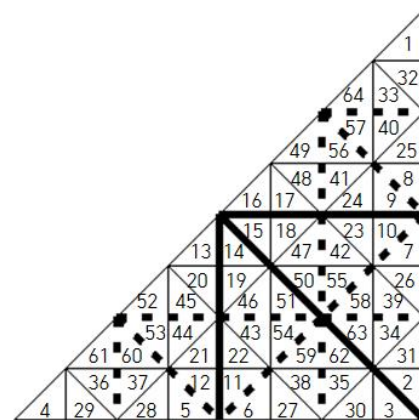


Fig. 10 3 Cycle Folding Layer Numbering

2 번 cell이 위치하는 구역은 B 구역의 A' 구역의 A' 구역에 위치한다. 이 때, 1 회 적용 시 만들어진 구역은 A, B, C, D 순서로 숫자가 기입된 후 역 순으로 D, C, B, A 순서로 기입하며 이후에는 다시 A, B, C, D 순서로 순방향과 역방향을 교대로 기입한다. 2 회 이상 반복으로 만들어진 구역은 역순 없이 순서대로 기입된다.

위의 규칙을 따라 순서대로 배열을 하면 아래와 같으며, 알파벳은 앞에 있는 것부터 크게 나뉜진 구역을 나타내며 뒤로 갈수록 crease pattern의 반복 횟수가 증가되어 작게 나뉜진 구역을 의미한다. 예를 들어 AB'A"는 1 회 적용된 A 구역 속의 2 회 반복 시의 B' 구역, 3 회 반복 시 A" 구역에 위치한 cell을 의미하며, Fig. 10은 완성된 모습을 보여준다.

AA'A" - BA'A" - CA'A" - DA'A" -
 DB'A" - CB'A" - BB'A" - AB'A" -
 AC'A" - BC'A" - CC'A" - DC'A" -
 DD'A" - CD'A" - BD'A" - AD'A" -

2.3 제작

개화형상을 모사한 가항력 돛 접기 방식의 전개 가능성을 확인하기 위해 mylar film을 이용하여 제작하였다. 한 변이 1500 mm인 직각 이등변 삼각형 형태로 재단하였으며, 최적 수납효율 분석 결과를 통해 crease pattern을 5 회 반복하여 적용하였다. Crease pattern 형상의 아크릴판을 제작하였으며 (Fig. 11(a)), mylar film 위에 제작한 아크릴 판을 모양에 맞춰 두고 cell을 따라 그린 후 (Fig. 11(b)) film의 두께로 인한 일그러짐 현상을 방지하기 위해 교차하는 지점의 크기에 맞춰 offset 구멍을 뚫었다. 미소크기를 갖는 offset의 경우 제작의 한계가 있다고 판단하여 2 mm 이상의 offset만 적용하였으며, 제작된 가항력 돛의 형상은 Fig. 12와 같다.

2.4 실험장치 구성 및 실험결과

가항력 돛 전개실험은 분할형태의 다수의 돛이 특정 방향으로 동시에 전개되어 하나의 돛의 형태를 이루는 segment 전개 방식을 적용하였다.

가항력 돛의 꼭짓점을 고정시킨 후 양 끝단에 와이

어를 연결하여 모터로 당기는 방법으로 전개 실험을 수행하였다. 전개 실험 시 가항력 돛과 바닥면의 마찰을 최소화하기 위하여 test bed를 테플론으로 코팅하였으며, 와이어로 인한 돛의 변형을 막기 위해 연결부에 링을 결합하였다. 모터에 톨을 부착하여 일정한 속도로 와이어를 당기도록 하였으며, 이는 링과 함께 3D printer(Objet 24)를 이용하여 제작하였다.

전개 시간에 따른 가항력 돛 전개실험 결과는 Fig. 13과 같으며, 가항력 돛에 생성된 구멍의 응력집중 현상과 jamming 현상으로 인한 가항력 돛의 손상은 발생하지 않았다.

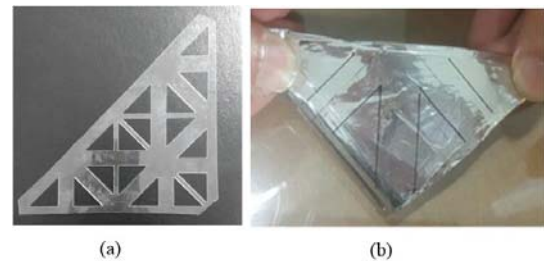


Fig. 11 Acrylic for Applying Offset and Sail with Offset Line

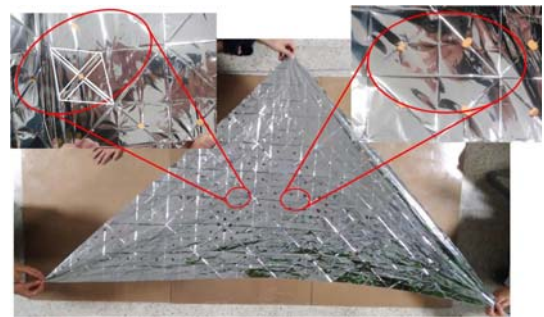


Fig. 12 Deployed Sail with Holes

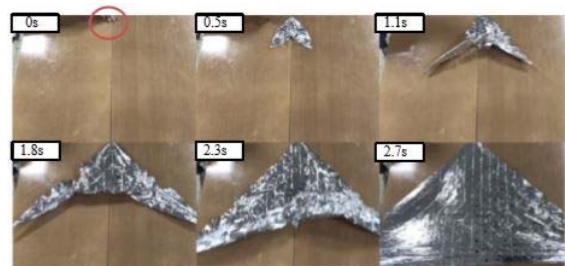


Fig. 13 Deployment Experiment

3. 결 론

본 논문에서는 가항력 돛의 수납효율을 개선시키기 위해 개화형상을 모사한 가항력 돛 접기 방식을 제안하였다. 개화형상을 모사한 가항력 돛 접기 방식은 동일한 crease pattern을 반복하여 적용할 수 있으며, offset method를 적용하여 여러 겹의 가항력 돛을 접을 때 발생하는 일그러짐 현상을 완화시킬 수 있다. 개화형상 모사 방식의 crease pattern을 분석하여 folding layer numbering을 수행하였으며, 이를 적용하여 offset 크기를 결정하였다.

개화형상 모사 방식을 적용한 가항력 돛의 전개 가능성을 확인하기 위해 segment 방식으로 가항력 돛을 제작하였으며, 전개 실험을 수행하였다. 전개실험 결과, 수납부피 대비 전개면적은 1: 68.64으로 나타났으며, 이는 기존의 태양 돛과 가항력 돛의 수납방식인 z-fold 방식(1: 36.33)을 적용했을 때와 비교하였을 때 약 1.88 배의 수납효율이 향상되는 것을 확인하였다. 또한, offset method를 적용하기 위해 생성된 가항력 돛의 구멍으로 인한 손상과 jamming 현상 없이 2.7 s 이내에 전개되었다.

후 기

본 연구는 한국연구재단을 통해 교육과학기술부의 우주기초원천기술개발 사업(NSL: National Space Lab)으로부터 지원받아 수행되었습니다.

(NRF-2015M1A3A3A02012496)

References

- [1] Y. Jung, "Recent Status of International Norms Under Discussion for Outer Space Activities and Its Roles," *Journal of The Society for Aerospace System Engineering*, vol. 8, no. 2, pp. 1-6, 2014.
- [2] United Nations. "Space Debris Mitigation Guidelines of the Committee on the Peaceful Uses of Outer Space," *Space Debris Mitigation Guidelines*, pp. 2-4, 2010.
- [3] O. R. Stohlman and V. Lappas, "Deorbisail: a deployable sail for de-orbiting," *In 54th AIAA/ASME/ASCE/AHS/ASC Structures, Structural Dynamics, and Materials Conference*, pp. 1806, 2013.
- [4] S. Hobbs, J. Kingston, P. Roberts, C. Juanes, R. Sewell, B. Snapir and M. Patel, "De-orbit Sail Design for Techdemosat-1," *In Sixth European Conference on Space Debris*, ESA/ESOC, Darmstadt, Germany, vol. 22, pp. 25, 2013.
- [5] J. Kingston, S. Hobbs, P. Roberts, C. Juanes-Vallejo, F. Robinson, R. Sewell and M. Patel, "Use of CYPRESTM cutters with a Kevlar clamp band for hold-down and release of the Icarus De-Orbit Sail payload on TechDemoSat-1," *Acta Astronautica*, vol. 100, pp. 82-93, 2014.
- [6] O. R. Stohlman and V. Lappas, "Development of the Deorbisail flight model," *In Spacecraft Structures Conference*, pp. 1509, 2014.
- [7] A. F. Heaton, B. F. Faller and C. K. Katan, "NanoSail: D Orbital and Attitude Dynamics," *In Advances in Solar Sailing*, Springer Berlin Heidelberg, pp. 95-113, 2014.
- [8] B. Edmondson, R. J. Lang, M. R. Morgan, S. P. Magleby and L. L. Howell, "Thick rigidly foldable structures realized by an offset panel technique," 2015.