

비행선용 막구조 설계기법 연구

김동민* · 강왕구* · 이진우* · 염찬홍*

Design technology of airship envelop materials

Dong-min Kim, Wanggu Kang, Jin-woo Lee, Chan-hong Yeom

Key Words: 기낭, 공기낭, 막재료, 재료시험, 설계개발시험

Abstract

비행선 기낭을 개발하기 위한 막재 요구조건과 이를 만족하기 위한 막재(membrane)의 구성을 살펴보고, 실제 연구에 사용된 기낭재료의 조성파 소재 기본 물성시험 그리고 접착강도, 패치강도 등과 같은 설계개발시험을 수행한 결과 및 향후 계획을 소개한다.

1. 서론

비행선은 기낭 제작 방식에 따라, 경식 (rigid), 연식 (blimp or non-rigid) 및 반경식 (semi-rigid) 비행선으로 구분된다[1]. 경식 비행선은 금속재 등으로 기낭 형상의 프레임을 구성한 뒤, 비행선의 외형을 씌우는 방식이다. 연식 비행선은 천을 이어 붙여 비행선의 형상으로 만든 다음, 내부 압력을 외부압 보다 높게 유지함에 따라 발생된 기낭의 막재응력 (membrane stress)에 의한 강성을 이용해 구조물을 장착하는 방식이다. 반경식은 두 가지 방식을 적절히 혼용하여 사용하는 구조 형식으로 일반적으로 기낭은 연식 비행선과 동일한 재료를 사용하며, 기낭 상부로부터 현가장치 (suspension system)를 이용하여 골격구조 (keel structure)를 지지하고 이를 활용하여 집중질량이나 집중하중을 견디도록 설계한다. 기낭은 기본적으로 부력을 발생시키는 헬륨의 손실(누출)을 최소화시키며, 비행시 습기, 강우, 우박이나 눈 등의 결빙, 자외선 적외선 등의 햇빛 등으로부터 내부 구조물을 보호한다. 비행선의 구조 중량 중 기낭은 개략적으로 50% 이상을 차지하므로 보다 가볍고 튼튼하며, 외부의 환경에 의한 손상이 적고, 헬륨 누수를 최소화할

수 있는 기낭을 제작하는 것은 비행선 개발에 가장 필수적 업무라 하겠다.

본 논문에서는 산업자원부 지원하의 차세대 신기술 연구개발사업의 하나로 진행 중인 성층권 비행선 개발사업의 초기 단계로 50m 무인 비행선 개발을 위한 연식 비행선의 기낭 개발[2]을 위한 접근 방안과 이에 소요되는 설계개발시험에 대해 기술하였다.

2. 기낭재료의 구성

비행선 기낭 재료는 헬륨의 누수를 방지하는 헬륨막(helium barrier)과 내압과 공기력 등을 지지할 수 있는 하중막(load carrier), 폴리머 섬유를 자외선으로부터 보호할 수 있는 UV 보호막(UV protector) 그리고 열접합을 위한 접착막(bonding & joining layer) 등을 적층하여 구성한다[3].

기낭막을 통하여 방출되는 헬륨의 양을 최소화하기 위한 헬륨막은 1~2 mil 정도의 폴리머 필름으로 구성된다. 헬륨막에 사용되는 폴리머 재료는 폴리에스터 계통의 mylar 필름이 일반적으로 사용되며, tedlar (Polyvinyl fluoride film)나 eval(Ethylene vinyl alcohol Polyvinyl fluoride film), 등의 신재료를 헬륨막으로 사용한 기낭재료도 선보이고 있다.

* 한국항공우주연구원 비행선연구그룹

표 1. 재료별 헬륨 투과율

| 재료명 | 헬륨투과율 liter/(m ² · 24hr · atm · mil) |
|--------|--|
| Mylar | 2.9 |
| Tedlar | 2.4 |
| Eval | 0.06 |

표 1은 1mil 두께의 1제곱 미터 크기의 막에 1 기압의 압력차를 두고 헬륨을 가압할 경우 각각의 재료별 하루동안 누설되는 헬륨의 양이다. Eval 필름은 누설량이 0.06liter로 아주 적음을 알 수 있다. Eval은 Mylar나 Tedlar에 비해 고가이고, 비행선 기낭재료에 쓰여진 경험이 적다는 단점을 가지고 있으나 헬륨누설 저지에 아주 좋은 특성을 가지고 있어 앞으로 그 쓰임이 증가할 것으로 예상된다. 저고도 비행선에는 제작 특성이 양호한 Mylar필름이 주로 사용되고 있다.

기낭막재료의 비강도 및 비강성은 기낭 운용내압과 공기력 및 관성하중 그리고 기낭에 부착되는 패치에 의한 응력집중 효과를 수용하는 값을 보유하는 재료를 선정해야 한다. 즉 비행선의 형상, 운용속도, 돌풍조건 등을 모두 고려하여, 비행중 wrinkling이 발생하지 않을 충분한 내압을 수용할 수 있는 재료 강도 및 강성을 보유할 수 있는 재료를 선정해야 한다. 막재료는 하중막을 통해 이들 하중을 담당하는데, 하중막은 폴리머 필름이나 직조된 폴리머 cloth로 구성된다.

표 2. 하중막재료별 특성치

| | 강도 (psi) | 밀도 (g/cc) | Elongation at break(%) | 온도 (℃) |
|-----------|-------------|--------------|------------------------------|-----------|
| Polyester | 29,000 | 1.39 | 110 | -50~200 |
| Spectra | 500,000 | 0.97 | 6 | -150~80 |
| Vectran | 400,000 | 1.4 | 3.3 | ~330 |
| PBO | 800,000 | 1.56 | 3 | ~500 |

하중막에 사용되는 막재료로는 폴리에스터, 벡트란(liquid crystal polymer), PBO (Poly-Benzol-Oxylene) 등이 사용된다. 폴리에스터는 하중강도는 다소 떨어지나 신축성이 좋아 응력집중현상을 막을 수 있어 기존 비행선에 주로 사용되어 왔다. 벡트란은 취성이 강한 재료로 제작 오차에 의한 응력집중으로 비행선에 사용이 지연되었으나, 제작기술 및 재료기술의 발달로

몇몇 첨단 비행선에 적용이 이루어지고 있다. PBO는 강도특성과 운용온도조건이 좋아 금성 탐사용 비행선, 기구등에 사용이 고려되고 있다. 성층권 비행선의 경우 PBO등의 첨단 재료의 사용이 불가피 할 것으로 보인다.

통상적으로 사용되는 비행선 기낭재료 자체는 고분자 물질로서 일반적인 운용조건에서는 온도, 습도 등에 대한 내환경성 및 내구성에는 큰 문제가 없으나 UV에 의한 성능저하는 심각한 문제점으로 대두된다. 이에 따라 UV에 의한 성능저하를 방지하기 위한 외피 표면은 UV 내성이 강한 재료나 코팅제를 사용한다. 이 막을 자외선 차단막이라고 한다.

비행선 기낭은 열접합(hot seaming), 고주파 접합(ultra sonic seaming) 혹은 접착제 접합(adhesive bonding) 공정을 사용한 제작이 가능하다. 고주파접합과 접착제를 사용할 경우, 사용막재료의 단가가 낮고 제작기간을 단축할 수 있는 장점이 있으나 접합부위의 내구수명이 짧고 균일한 접합강도를 얻기 어려운 단점이 있어 열접합이 주로 사용된다. 열접합은 접합되는 두 막재료의 한 층을 열로 녹여 붙이는 공법으로, 폴리우레탄 필름이 사용된다.

본 연구에 적용할 재료는 미국 TCOM사에서 구매하였는데, 기낭재료로는 L14, 공기낭 재료로는 HA1을 각각 사용한다. L14는 헬륨차단막으로 tedlar film을 사용하고, 하중막으로는 폴리에스터 cloth를 그리고 접합막으로는 폴리우레탄 막으로 구성했다[그림 1].



그림 1. 기낭막재료 구성(L14)

Tedlar 필름은 헬륨 차단특성뿐 아니라, UV 내성도 강한 특징을 지니고 있어, L14에서는 헬륨막과 UV 차단막의 기능을 동시에 수행한다. 이렇게 두가지 역할을 하나의 막이 수행함으로써 전체적인 중량을 줄일 수 있는 장점이 있다.

3. 기본 물성시험

기낭재료 개발을 위해서는 설계 데이터를 실험에 의한 검증이 필요하다[4]. 이러한 데이터는 기낭구조 재료선정을 위한 기본 정보를 제공한다. 여기서는 최종 사용자 입장에서 설계에 필요한 기본 물성치를 확보하기 위한 항목 위주로 검토하고 설계 데이터 확보를 위해 수행한 시험 내용을 수록하였다. 사용자 입장에서 기낭 재료선정을 위해 고려해야 할 사항은 여러 가지가 있으나, 성능적 측면에서 가장 중요한 사항은 비강도, 비강성, 기밀성, 내환경성 및 내구성이라 하겠다.

표 3. 기낭재료 물성시험

| 시험명 | 용도 및 목적 | 시험방법 |
|--------------------------|---------------|-------------------------|
| Tensile Modulus | 인장강성 | ASTM D 751 |
| Breaking Strength | 파괴강도 | FED-STD-191 TM5102 |
| Seam Tensile Strength | 접착 강도 | FED-STD-191 TM5102 |
| Peel Strength | 접착 강도 | ASTM D 1876 |
| Tear Strength - Cut Slit | 파단균열 진전 특성 분석 | FAA P-8110-2 Appendix A |

기낭 재료시험에 관련된 항목을 정리하고 구조 설계에 필요한 자료를 얻기 위해 수행한 재료시험 결과를 수록하였다. 설계자료를 얻기 위한 기본물성시험은 표 3, 기타특성 및 환경/내구성 시험은 표 4에 각각 정리하였다. 이와 같은 목적으로 접착 공정검사에 Seam Tensile Strength나 Peel Strength 시험을 적용한다.

표 4. 기타특성 및 환경/내구성 시험

| 시험명 | 용도 및 목적 | 시험방법 |
|---------------------|-----------|--------------------|
| Helium Permeability | 헬륨 기밀 특성 | ASTM D 1434 |
| Flexibility Test | 반복접힘 하중수명 | ASTM 2097 |
| Crease Effect | 접힘 강도저하 | No Standard Method |
| UV Exposure | 자외선 강도저하 | ASTM G 154 |

본 연구에 사용된 기낭재료 L14와 공기낭 재료 HA1에 대한 기본 물성치 시험을 수행하였고 그 결과는 표 5로 정리하였다. 시험결과 선택된 기낭재료와 공기낭 재료는 설계요구조건을 모두 충족하는 것으로 밝혀졌다.

표 5. 시험결과 (기낭재료 : L14)

| 시험명 | 기낭재료 (L14) | 공기낭재료 (HA1) | 비고 |
|-----------------------------------|------------------------|------------------------|--|
| 결함검사 | 적합 | 적합 | Lot 별 sampling, Bow, Skewness and Defect |
| Blocking | No | No | Lot 별 sampling, 3개 시편 시험 |
| 중량 (g/m ²) | 196.2 | 63.9 | Lot 별 sampling, 평균값 |
| 헬륨투과율 (l/m ² /day/atm) | 최대 1.359 | - | 3개 시편 각 3회 측정, |
| 강성 (Kgf/cm) | Warp 291 Fill 169 | Warp 96.3 Fill 54.3 | |
| 강도 (Kgf/cm) | Warp 31.6 Fill 29.4 | Warp 9.2 Fill 7.7 | |
| 결합인장강도 (kgf) | 최소 80 | 최소 21 | No seam failure |
| Peel Strength | - | - | No peeling |

4. 설계 개발시험

위와 같은 기낭 및 공기낭 재료를 가지고 비행선을 설계함에 다음과 같은 설계 개발 시험의 수행이 필요하다. 먼저 기낭에 부착되는 노즈콘, 배튼, 끈돌라, 핀 등의 장착을 위한 패치의 설계 및 시험이 필요하다. 비행선 외부에 부착되는 구조물은 대부분 패치를 이용하여 부착함으로써, 기낭에 가해지는 하중을 적절히 분산하여 기낭의 인장하중으로 지탱하게 된다. 본 연구에서 다루는 기낭에 사용된 패치는 원형 패치와 핑거형 패치로 구분된다[그림 2]. 패치강도 시험을 통하여 각 패치의 설계강도가 결정된다.

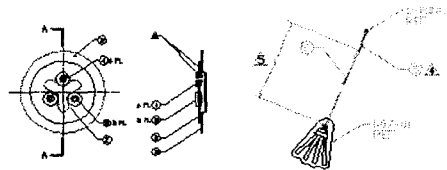


그림 2. 패치 형상 (circular and finger type)

실제 패치 강도시험은 내압을 받고 있는 기낭을 모사하며 수행하여야 하나, 내압을 받는 기낭을 적절하게 모사하기는 매우 어렵다. 본 연구에서는 보다 단순화한 시험치구를 사용하여 패치강도를 측정하였다[그림 3]. 현재까지 수행된 패치강도시험 결과를 요약하면 표 6과 같다. Type-I

은 노즈콘 및 배튼 장착에 사용할 패치이고, Type-II는 곤돌라나 핀 장착에 사용할 패치로서 주로 접선 방향의 하중에 견딜 수 있도록 설계한다. Type-III과 Type-IV는 같은 형상을 가지나, Type-III는 기낭 외부에 인장하중이 작용하는 부위에 적용할 패치이고, Type-IV는 기낭 내부에 부착하여 공기낭 등을 지지하는 용도로 사용되는 패치이다.

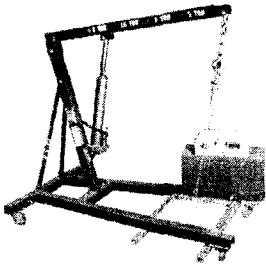


그림 3. 패치 강도시험

표 6. 패치 강도시험 결과

| 패치종류 | 설계강도 (Kgf) | 비고 |
|----------|------------|-------------------|
| Type-I | 124.9 | Two fingers |
| Type-II | 726.4 | Four fingers |
| Type-III | 226.1 | Circular external |
| Type-IV | 207.9 | Circular internal |

기낭 재료의 tearing 특성을 측정하는 것 또한 매우 중요한 설계 개발 시험 항목이다. Tearing test는 설계제한하중에 해당하는 내부압력이 작용되었을 때, 균열이 있는 기낭일지라도 급속한 헬륨방출이나 내부압력 감소에 따른 사고를 방지할 수 있도록 하기 위한 요구조건이다[5]. 즉 설계제한 내압조건에서 손상이 있는 기낭의 균열이 급속히 파열단계로 진전되지 않음을 증명해야하는 것이다. 본 개발에서 적용하는 재료는 목표로 하는 운용조건 내에서 이미 이러한 조건을 만족하는 것으로 알려져 있으나, 필요시 소형 기낭을 제작하고 인공적인 균열을 설치하여 운용제한하중에서의 진전여부를 평가토록 할 예정이다[그림 4].

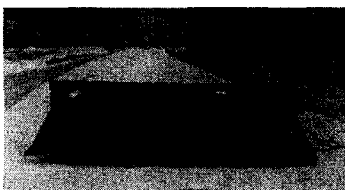


그림 4. Tearing Test 시편

Burst 시험은 기낭 각 재료들을 접합하여 기낭을 제작할 경우, 국부적인 응력집중에 의한 기낭의 파단(burst) 특성을 파악하기 위하여 실시된다. Burst 시험은 설계된 기낭과 동일한 재료와 제작공정에 따라 제작된 축소모델을 사용하여 수행한다. 본 개발에서는 1/5 축소모형을 이용하여 기낭 burst 시험을 수행할 계획이다.

5. 결론

본 논문에서는 국내에서의 체계적 개발 경험이 없는 비행선의 기낭구조 개발을 위하여 기낭구조의 구성과 개발에 사용된 실제 재료를 소개하고 현재까지 수행된 설계개발시험 결과, 그리고 향후 수행될 업무를 소개하였다. 기낭구조개발 계획은 향후 인증을 고려하여 FAA 요구조건 및 MIL Spec. 등을 참조하여 수립하였다. 설계개발 시험은 기 수행된 기낭 소재시험과 패치 강도시험 결과를 수록하였으며, 향후 수행될 과열시험 및 burst 시험을 개괄적으로 소개하였다.

후기

본 연구는 산업자원부 주관인 차세대 신기술사업의 일환으로 진행중인 “다목적 성층권 장기체공 무인비행선 개발” 사업을 통해 수행되었음.

참고문헌

- [1] 강왕구, 김동민 외 3명, “비행선의 역사 및 신개념 비행선,” 한국항공우주학회지 제29권 제2호, 2001, pp.152-164
- [2] 김동민, 염찬홍 외 3명, “다목적 성층권 장기체공 무인비행선개발,” 한국항공우주학회 춘계학회지, 2001
- [3] 강왕구, 김동민 외 3명, “비행선의 구조 및 재료,” 한국항공우주학회지 제29권 제2호, 2001, pp.141-151
- [4] FAA-P-8110-2, Airship Design Criteria, U.S Department of Transportation Federal Aviation Administration, 1995
- [5] T. Miller and M. Mandel, “Airship Envelopes: Requirements, Materials and Test Methods,” 3rd International Airship Convention and Exhibition, 2000, Paper A-19
- [6] <http://airship.kari.re.kr/>, 다목적 성층권 비행선 개발사업 홈페이지