

# 복합재를 이용한 50m급 비행선 구조개발

양남선\*·강왕구\*·김동민\*·이진우\*·염찬홍\*\*

## Development of 50m Class Airship Structures

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

### Abstract

KARI developed 50m class unmanned airship. The airship employ the pressure envelope design principle. The envelope must be considered as a main structural element of the airship. The envelope & three ballonets are fabricated by polyfiber composite laminates. Other structural components (gondola, tailwing, nosecone & engine mounts) are manufactured by carbon fiber & glass fiber laminates. In order to develop a big unmanned airship, a large amount of structural design, analysis and tests had to be made. The paper describes the structural configuration of the 50m class unmanned airship which are basic starting point of the structural development of an airship. The paper includes the various designing processes, components development tests and analysis results. Envelope & ballonets development processes which are very different to conventional airplane design are given in details with actual analysis & test results. The paper also describes the structural design and analysis results for other composite made structures. Each components were tested by static design limit loads and structural safety were confirmed. The paper shows the manufactured structural components and assembled airship.

**Key Words:** 비행선, 기낭, 공기낭, 곤돌라, 연결합, 정하중 시험, 기낭과열시험, 강도시험

### 1. 서론

최근 복합재 및 섬유 등 신소재의 개발이 활발해짐에 따라 여러 나라에서 신개념의 비행선 개발이 활발해지고 있다. 현재 개발 중인 비행선은 50m급 중형 무인비행선으로서 차후 개발예정인 실증권 비행선 개발사업의 초기단계의 비행선이다. 기낭 제작 방식으로는 연식(non-rigid)비행선으로 분류된다. 연식비행선은 여러개로 채단된 천을 이어붙여 만든 비행선 외형에 내압을 외압보다 높게 유지하여 형성된 기낭의 막재응력을 이용하여 구조물을 장착하는 방식이다.(1) 본 50m급 비행선을 구성하는 구조물은, 저밀도 기체를 채워 넣어서 비행선의 외형을 형성하는 기낭(envelope)과 기낭의 압력조절을 위한 보조기낭

(ballonet), 꼬리날개, 엔진추력을 조종력으로 이용하기 위한 추력엔진마운트, 그리고 비행선 운용장비 탑재를 위한 곤돌라 등이다.

본 논문에서는 현재 개발중인 50m급 무인 비행선을 구성하는 기체구조 개발을 위하여 기체구조의 건전성을 확보하고 각 구조물의 설계 및 해석, 시험, 그리고 제작 및 조립 등에 관하여 서술하고자 한다.

### 2. 설계 및 해석

#### 2.1 설계 및 재료

비행선 설계하중의 개발임무에 대한 비행선의 구조설계 기준으로 미연방항공규정 FAA-P-8110-2을 적용하였다.(2) 비행선의 양력은 대부분 부력에 의존하기 때문에 상대적으로 기체구조의 무게에 예민하다. 따라서 최대한 경량구조물이면서 구조적 안정성을 확보하여야한다. 비행선은 길이 50m, 최대직경 12.5m인 타원체 형상의 동체에

\* 한국항공우주연구원 비행선그룹

\*\* 한국항공우주연구원 항공체계실

inverted-Y형상의 핀을 가지고 있다. 비행선 전방에는 노즈콘이 있어서 기낭의 전방부를 보강한다. 기낭의 중앙부 양쪽 측면에는 추력모터를 케이블과 부착판을 통하여 직접 부착하였다. 끈돌라는 기낭의 하부에 부착되어 있고 그 내부에는 발전기, 연료, 전기장치, 전자장비등 임부에 필요한 장비를 탑재하고 있다. 이들 구조물들은 패치를 이용하여 결합한뒤, 케이블을 이용하여 기낭에 연결되어 있다. 기낭과의 연결에 사용된 패치는 하중의 크기에 따라 4종류로 나누어진다.

기낭은 부력기체인 헬륨을 지속적으로 담아두며 외부형상을 구성하여 공력을 발생시킨다. 기낭 내부에는 압력조절을 위해 3개의 공기낭이 설치되었다. 기낭과 보조기낭의 설계요구조건은 가볍고 외부환경에 잘 견디며 헬륨누수를 최소화할 수 있어야한다. 기낭과 보조기낭의 구성은 헬륨누수방지층, 하중막, uv보호막, 접착막 등의 기능을 수행할 수 있는 여러층의 폴리머으로 구성된 막구조(membrane structure)이다. 본 50m급 비행선에 적용된 기낭재료는 미국 TCOM사의 L14(기낭), HA1(보조기낭)이며 헬륨차단막은 tedlar film, 하중막은 폴리에스터 cloth, 그리고 접합막은 폴리우레탄을 사용하였다. 기낭의 강도에 대한 설계요구조건(FAA-P-8110-2)에 따르면 설계하중하에서 안전계수 4를 적용하여 구조적으로 안전하여야 한다. (3)

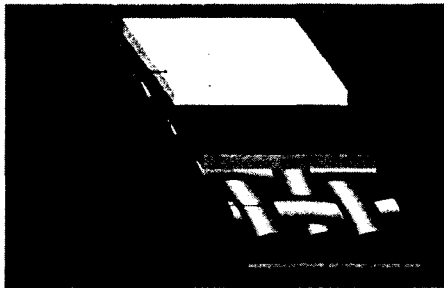


그림 1 기낭재료 구성

비행선 운용을 위하여 기낭에 부착되는 구조물 중에서 꼬리날개, 엔진마운트, 끈돌라를 구성하는 재료는 대부분 경량성을 위하여 비강성이 우수한 카본(SK사) 복합재료를 사용하였다. 또한 굽힘강성과 좌굴 강성이 요구되는 구조물에 대해서는 하니콤 샌드위치 구조를 적용하였다. 꼬리날개와 엔진마운트의 스킨은 그리고 기수보강재, 이.착륙장치와 접합부분등 인성이 요구되는 구조물에 대

하여서는 알루미늄등 금속재료로서 구성하였다.

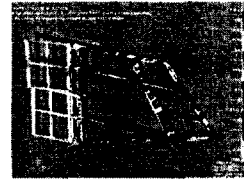
표 1. 적층판의 재료 물성치

-Plain Weave Carbon(WSN3K, t=0.0224cm)

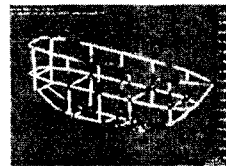
E1 (Kgt/cm <sup>2</sup> )	E2 (Kgt/cm <sup>2</sup> )	G12 (Kgt/cm <sup>2</sup> )	Poisson's R	Density (Kgt/cm <sup>3</sup> )
700,000	700,000	38,400	0.09	0.0016
Xt (Kgt/cm <sup>2</sup> )	Xc (Kgt/cm <sup>2</sup> )	Yt (Kgt/cm <sup>2</sup> )	Yc (Kgt/cm <sup>2</sup> )	Fs (Kgt/cm <sup>2</sup> )
9,500	5,820	9,500	5,820	1,050
Fbr_base (Kgt/cm <sup>2</sup> )	E/D=2.0	e/D=2.5	e/D=3.0	
	4,390	5,130	5,980	

## 2.2 구조해석

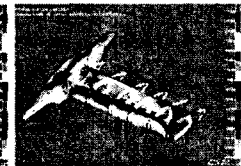
50m급 비행선 기체구조를 상세해석하기 위하여 범용프로그램(MSC/NASTRAN)을 이용하여 구조해석을 수행하였다. FAA-P-8110-2에 따른 비행하중, 조종하중, 그리고 지상하중 등 최대설계하중이 산출되었다. 유한요소해석으로 하중분포 및 변형과 더불어 각 부위의 파손모드에 따른 상세해석을 수행하여 구조물의 안정성을 검토하였다. 케이블의 비압축 특성을 적용하기 위하여 비선형 정적해석을 수행하였다.



a) 꼬리날개



b) 끈돌라



c) 엔진마운트

그림 2 비행선 연결구조물 응력해석

복합재료의 안전성 검토를 위해 복합적층판 이론에 따른 "First Ply Failure"을 기준으로 삼고 단층 파손이론은 "Tsai-Wu ploynomial thory"를 적용하여 안전율을 계산하였다.(4,5)

$$MS = \frac{1}{I_{Tsai-wu} \times S.F} - 1$$

꼬리날개의 최대한 경량화를 위해 스파와 리브의 개수와 간격의 최적화를 요한다. 본 해석에서 목표하는 무게의 꼬리날개 형상을 얻었지만 해석

결과 넓은 베이(bay)에서 비롯된 좌굴특성에 매우 취약하였다. 이를 해결하기 위하여 대부분의 웨브를 하니콤 샌드위치 구조로서 구성한후 중앙부분을 최대한 cut-out을 실시하였다. 꼬리날개 전체 좌굴강성, 하니콤 국부좌굴 해석 등에 중점을 두었다.(6)

표 2 연결구조물 적층판 안전율 (Tsai-Wu Failure Criteria)

Structure		Materials	Min. Margin of Safety (Tsai-Wu)	LC
Tailwing	Fin	WSN3K	0.67	demax
	Control Surface	WSN3K	1.67	gust
Engine Mount System		WSN3k	0.57	2a
Gondola		HG181	0.56	Land2

추력엔진을 부착하기위한 엔진마운트 구조물은 추력로부터 기인되는 추력하중을 충분히 감당할 수 있는 구조여야하며 특히 기낭 부착부위에서 큰 응력집중이 발생할 수 있다. 이를 해결하기 위하여 기낭 부착부위에 보강판과 보강프레임을 설치하여 하중을 최대한 분산시켰다. 윙박스 형태인 지지팔에서 하중 흐름을 대부분 감당하는 스파캐은 32ply로서 plain weave와 UD를 적절히 적층하여서 축하중과 굽힘하중을 충분히 견딜 수 있도록 하였다.

비행운용 장비를 탑재한 곤돌라는 약 1톤 정도의 payload와 이.착륙에 따른 하중을 감당할 수 있는 구조이어야 한다. 특히 전.후방 하중분포 불균형은 기낭과 연결부위의 어느 한쪽에 과다하중이 작용할 수 있으므로 최대한 이를 피할 수 있어야한다. 곤돌라에서는 장비의 외부환경으로부터 보호할 수 있도록 스킨이 glass fabric 복합재로서 구성되어 있지만, 카본복합재로 구성된 프레임이 모든 하중을 감당할 수 있도록 보수적인 해석결과를 유도하였다. 랜딩기어와 발전시스템이 부착되는 하부 프레임에 큰 응력이 발생하였다.

### 3. 제작 및 시험

#### 3.1 구조시험

비행선 구조물은 기낭과 공기낭과 같이 가압을 하여 구조를 유지하는 구조물과 꼬리날개,곤돌라 등의 재료 자체의 강성으로 형상을 유지하는 구

조물로 구분된다. 기낭과 공기낭 제작재료에 대한 물성시험을 수행하였다. 강도, 헬륨투과율, 접착강도, tearing test 등을 수행하였다.

표 3 기낭/공기낭재료 물성시험 결과표

시험명	기낭재료 (L14)	공기낭재료 (HA1)	비고
검안검사	적합	적합	Lot # sampling, Bow, Skewness and Defect
Blocking	No	No	Lot # sampling, 3개 시편 시험
중량 (g/m <sup>2</sup> )	196.2	63.9	Lot # sampling, 펄크값
헬륨투과율 (l/m <sup>2</sup> /day/atm)	최대 1.359	-	3개 시편 각 3회 측정
굽힘 (Kg/cm)	Warp 291 Fill 169	Warp 96.3 Fill 54.3	
장도 (Kg/cm)	Warp 31.6 Fill 29.4	Warp 9.2 Fill 7.7	
검함인장강도 (kgf)	최소 80	최소 21	No scam failure
Peel Strength	-	-	No peeling

기낭에 구조물을 부착하는 패치에 대한 강도시험을 수행하였다. 각 패치들에 대한 강도시험을 바탕으로 패치의 최대하중을 정의하였으며, 이를 구조물 설계에 반영하였다.

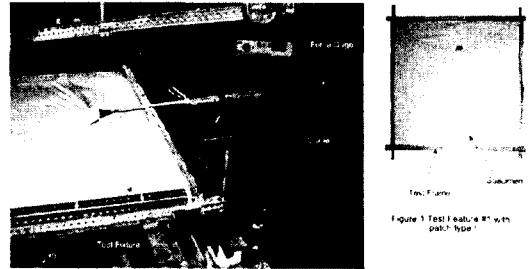


그림 3 패치 강도시험

기낭은 내압에 의해 형상을 유지한다. 기낭에 가할 수 있는 최대 내압을 정하기 위하여 기낭 파열 시험을 수행하였다. 파열시험에서는 10m 크기의 축소기낭을 제작한 뒤, 압축기를 이용하여 가압하여 파열이 되는 최대 내압을 측정하였다. 10m 축소기낭은 800mmAq에서 파열되었고 이는 50m 기낭에서는 160mmAq의 파열내압을 의미한다. 파열형상을 고속카메라로 기록하여 파열되는 형상을 관찰하였다. 시험결과 파단은 기낭 중앙부위에 원형 부착물로부터 시작되었음을 알 수 있다. 원형 부착물의 물성치와 기낭의 물성치의 상이함으로 인해 응력집중이 발생한 결과로 파악

된다.



그림 4 축소기낭 파열시험

곤돌라, 꼬리날개, EMS 등 복합재료로 제작된 구조물에 대한 재료시험과 정하중 시험을 수행하였다. 정하중 시험은 비행선에 대한 하중해석을 통해 산출된 비행제한하중(limit load)와 극한하중(ultimate load)를 곤돌라, 꼬리날개, 추력모터마운트(EMS)에 휘폴트리 시스템을 통하여 하중을 부가하는 형태로 수행되었다. 해석결과를 바탕으로 선택된 구조 취약부위에 스트레인 게이지를 장착하여 구조변형을 측정하였으며, 기낭 부착 케이블의 반력을 측정하였다. 제한하중하에서 영구변형이 없음을 증명하였으며, 극한하중에서 파손이 발생하지 않음을 증명하였다.



그림 5 구조물 정하중 시험

### 3.2 제작과 총조립

기낭과 공기낭은 막재료를 열접합하여 제작한다. 기낭과 공기낭 재료는 폴리우레탄으로 코팅되어 있다. 코팅된 폴리우레탄에 열을 가하여 재단된 두개의 고어를 접합한다. 열접합을 위하여 특수제작된 접합기를 사용하였다. 제작순서는 먼저 설계된 cut-file에 따라서 기낭/공기낭재료를 재단한다. 재단된 cut-file을 고어라고 한다. 각각의 고어에 패치를 가공하여 접합하고, 헬륨밸브, 온도센서, 압력센서등을 부착할 원형 부착부위를 가공한다. 가공된 각 고어를 열접착하여 기낭과 공기낭을 완성한다. 열접착을 위하여 특수하게 설계된 열접합기를 사용하여, 각 재료와 공정에

알맞은 열접합 사이클을 찾아 접합을 수행한다. 열접합 사이클은 접합 온도 및 시간 그리고 접합 압력으로 구성된다.

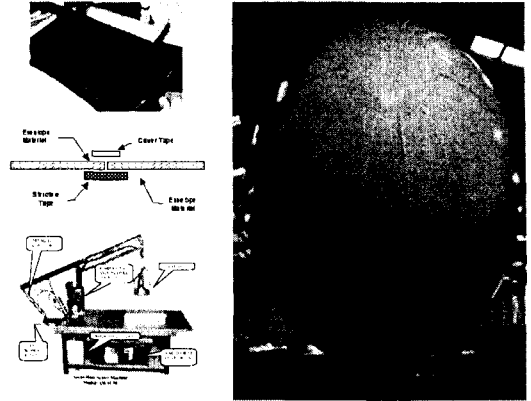


그림 6 기낭/공기낭 열접합 공정 및 결과

복합재료 제작된 구성품은 몰드를 제작하여 단품들을 레이업으로 제작한다. 제작된 단품들을 조립하여 프레임에 형성한 뒤에 프레임에 우포를 씌워서 스킨을 제작한다. 스킨에 방수 처리를 한 뒤에 페인팅을 한다. 페인트에는 UV 보호를 위한 처리로 은분을 첨가하였다.

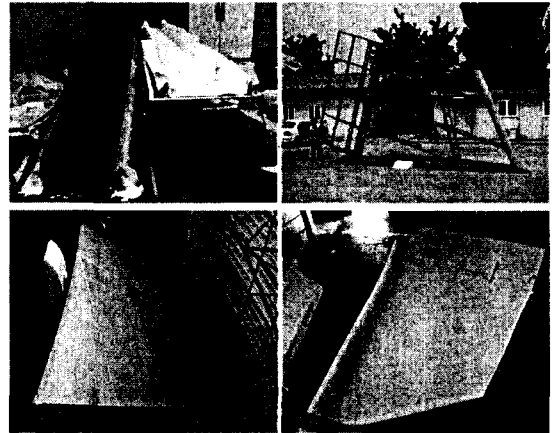


그림 7 비행선 구조구성품 제작공정 및 결과

## 4. 결론

기낭 및 공기낭, 꼬리날개, 곤돌라, 노즈콘 그리고 추력모터마운트를 완성한 뒤 총조립을 수행하였다. 총조립은 기낭과 공기낭을 조립한 뒤, 헬륨을 넣어 부력을 얻은 뒤 주요 구조 구성품을 조립하는 순서로 진행되었다. 총조립은 전남 고흥

에 위치한 항공센터내 비행선 행가에서 진행되었다. 본 연구를 통하여 복합재를 이용한 중형급 비행선을 성공적으로 개발하였다. 비행선에 대한 구조설계 및 제작 인증시험 기법을 확보하였다.

구조적 안정성에 관한 연구”, 한국항공우주학회 춘계학회지, 2003

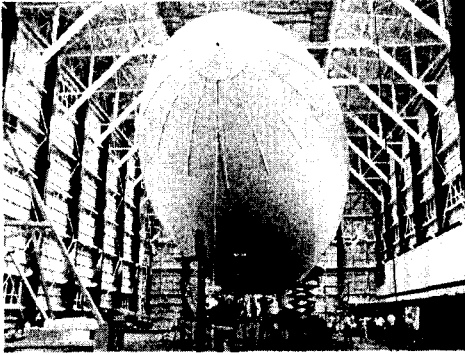


그림 8 조립 완성된 비행선

개발된 비행선은 2003년 9월 현재 비행시험을 수행중에 있다. 비행시험 결과를 바탕으로 보다 안정적이고 신뢰성있는 비행선 기체를 개발하기 위하여 노력하고자 한다.

### 후 기

50m급 비행선은 산업자원부의 차세대 신기술 사업으로 추진된 성층권 비행선 개발 사업의 일환으로 개발되었다. 기납 및 기타 기체 개발에 참여해준 업체관계자 분들께 감사드린다.

### 참고문헌

- (1) 김동민, 염찬홍 외 3명, “다목적 성층권 장기 체공 무인비행선개발”, 한국항공 우주학회 춘계학회지, 2001
- (2) FAA-P-8110-2, Federal Aviation Administration, “Airship Design Criteria”, 1995
- (3) 강왕구, 김동민 외 3명, “비행선의 구조 및 재료”, 한국항공우주학회지 제29권 제2호, 2001
- (4) Boeing Company, “Advanced Composite Design Handbook”, 1986
- (5) Michael Chunyung Niu, “Airframe Stress Analysis and Sizing”, 1997
- (6) 양남선, 강왕구 외 1명, “비행선 꼬리날개의