

## 論文

## 고고도 장기체공무인기 경량 주익 스파 설계

신정우\*, 박상욱\*\*, 이무형\*\*, 김태욱\*\*

## Light Wing Spar Design for High Altitude Long Endurance UAV

Jeong Woo Shin\*, Sang Wook Park\*\*, Mu-Hyoung Lee\*\* and Tae-Uk Kim\*\*

## ABSTRACT

There are several methods to improve the flight efficiency of HALE(High Altitude Long Endurance) UAV(Unmanned Aerial Vehicle). Airframe structural point of view, weight reduction of the airframe structure is the most important method to improve the flight efficiency. In order to reduce the weight of airframe structures, new concepts which are different from traditional airframe structure design such as the mylar wing skin should be introduced. The spar is the most important component in a mylar skin wing structure, so the spar weight reduction is the key point for reduction of the wing structural weight. In this study, design trade-off study for the front spar of the HALE UAV wing is conducted in order to reduce the weight. Design and analysis procedure of high aspect ratio wing spar are introduced. Several front spar structures are designed and trade-off study regarding the weight and strength for the each spar are performed. Spar design configurations are verified by the static strength test. Finally, optimal front spar design is decided and applied to the HALE UAV wing design.

**Key Words** : HALE(고고도 장기체공), Light Weight Structure(경량 구조), Wing Spar(주익 스파), Non-linear Structure Analysis(비선형 구조해석)

## 1. 서 론

세계적으로 그린에너지(Green Energy)에 대한 관심이 높아지고 있으며 이에 대한 연구가 활발히 진행되고 있다. 항공분야에서도 관련 연구의 하나로 전기동력항공기(Electric Powered Airplane) 개발에 대한 다양한 시도가 이루어지고 있다[1]. 특히 고고도 장기체공(HALE, High Altitude Long Endurance)을 위해서는 태양전지(Solar Cell)를 이용한 전기동력 시스템이 필수적이다.

한국항공우주연구원에서는 2010년부터 태양전지를 이용한 전기동력무인기를 개발 중에 있다. 주익 스파(Wing Span) 7 m급인 소형 전기동력무인기 EAV-2를 개발하여 고도 5 km 상승에 성공하였으며, 주익 스파 10 m급인 중형 전기동력무인기 EAV-2H는 저고도에서 25시간 연속 비행에 성공하였다(Fig. 1). 현재는 성층권에서 장기체공이 가능한 전기동력무인기 EAV-3의 개발이 진행 중에 있다.

장기체공을 위해서는 항공기 운항효율이 높아야 한다. 주익의 세장비(Aspect Ratio)를 크게 하여 양항비를 향상 시켜 운항효율을 높일 수 있다. 또한 항공기 경량화를 통해 운항효율을 증가시킬 수 있다. 항공기 기체구조 측면에서는 구조 경량화가 가장 중요한 운항효율 증대 방법이다. 기체구조는 기존의 일반적인 항공기 구조와 다른 개념을 적용해야 경량화가 가능하다.

2014년 05월 27일 접수 ~ 2014년 06월 17일 심사완료  
논문심사일 (2014.06.12, 1차)

\* 한국항공우주연구원 항공기술연구소

\*\* 한국항공우주연구원 항공기술연구소

연락처, E-mail : jeongdal@kari.re.kr

대전시 유성구 과학로 169-84

고고도 장기체공 무인기 구조 설계에 대한 문헌은 거의 찾아보기 힘들다. 성층권에서 14일 21분 연속비행에 성공한 Zephyr[2]는 EAV-3와 형상 및 중량이 유사하지만, 구조 설계에 대해서는 보고된 바 없다. Frulla와 Cestino는 주익 스팬 75 m인 고고도 장기체공 무인기 개발의 전 단계로 주익 스팬 24 m인 축소형 무인기에 대한 구조 설계를 수행하고, 설계 검증을 위한 구조시험을 수행하였다[3]. 상기 연구에서는 고고도 장기체공 무인기 주익 구조설계에 대해 비교적 상세히 기술하고 있다.

본 논문에서는 세장비가 큰 고고도 장기체공 무인기의 주익 구조에서 가장 중요한 하중부재인 전방스파(Front Spar) 설계 과정에 대해 기술하고 그 결과를 제시한다. 고세장비 주익 스파를 설계하기 위한 설계 및 해석 방법을 정립한다. 정립된 설계 및 해석 방법을 이용해 중량을 최소화 하기 위한 다양한 형상의 스파를 설계한다. 각 스파에 대해 중량과 강도 등에 관한 Trade-off 분석을 수행하고 구조시험을 통해 검증한다. 최종적으로 최적화된 전방스파 형상을 확정하고 이를 고고도 장기체공 무인기 설계에 적용한다.



Fig. 2 Electric Powered UAV - EAV-2H

## 2. 주익 스파 설계 및 해석

### 2.1 주익 구조

Fig. 2는 EAV-2H의 주익 구조 배치를 보여주고 있다. 전방스파와 후방스파(Rear Spar), 리브(Rib), 마일러 표피(Mylar Skin), 표피 가드(Guard), 에일러론(Aileron)으로 구성되어 있다.

표피는 경량화를 위해 마일러로 설계하였다. 따라서 표피는 하중을 거의 지지하지 못한다. 이

로 인해 주익에 작용하는 대부분의 하중을 스파가 지지하게 된다. 스파는 CFRP(Carbon Fiber Reinforcement Plastic) 복합재료를 이용해 설계하였다. 리브는 익형을 유지하며, CFRP 또는 GFRP 복합재료와 발사(Balsa) 또는 폼(Foam)을 이용한 샌드위치로 설계 하였다. 공력성능 유지를 위해 주익 전방과 후방에 GFRP 복합재료와 발사 샌드위치를 사용해 표피 가드를 설계하였다. 운송의 편의를 위해 분리 가능한 구조로 주익을 설계하였다.

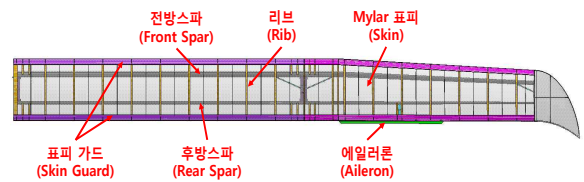


Fig. 3 Wing Structure Lay-out

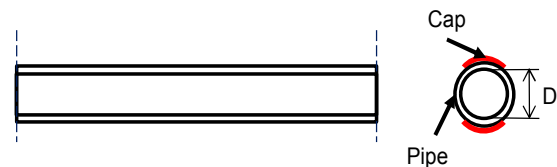


Fig. 4 Spar Configuration - Pipe/Cap and Inner Diameter D

### 2.2 전방스파 설계

전방스파는 주익에 작용하는 대부분의 하중을 지지하는 부재로서 가장 중요한 구조물이다. 전방스파는 원형 형상으로 설계 되었으며 Fig. 3과 같다. 주익의 비틀림 모멘트는 Pipe의 45° 방향의 복합재료가 주로 지지한다. 굽힘 모멘트는 스파 상/하부에 장착된 Cap의 0° 방향 복합재료가 주로 지지하며, Pipe도 일부 지지한다. 전단력은 Pipe와 Cap이 지지한다.  $D$ 는 스파의 내경이다.

EAV-2H는 국내업체가 생산하는 T-700급 CFRP 복합재료를 사용하여 전방스파를 설계하였다. EAV-3의 설계 초기에도 T-700급 복합재료를 사용하였으나, 최근 국내업체에서 T-700급 복합재료에 비해 비강성 및 비강도가 20% 이상 향상된 T-800급 CFRP 복합재료를 생산하고 있어 EAV-3에 이의 적용여부를 검토 중에 있다.

스파 설계에 사용한 하중은 돌풍하중이며, FAR 23.341에 따라 돌풍하중배수(Gust Loads Factor)를 구하고 이를 적용하였다[4]. 설계에 적용한 최대 돌풍하중배수는 3.9 이며, 이를 적용하

여 하중해석을 수행하여 설계에 적용할 주익 하중을 산출하였다.

### 2.2.1 전방스파 A 설계 형상

개발 초기에는 아래와 같은 간단한 수식을 통해 전방스파 사이징을 수행하였다.

$$\epsilon_{f\_pipe\_shear} = \frac{V}{A_{f\_pipe} G_{f\_pipe}} \quad (1)$$

$$\epsilon_{f\_bending} = \frac{My}{E_f I_f} \quad (2)$$

$$\epsilon_{f\_pipe\_torsion} = \frac{V \cdot a_f + T}{2 \cdot A_{f\_pipe} G_{f\_pipe} t_{f\_pipe}} \quad (3)$$

여기서  $\epsilon_{f\_pipe\_shear}$  는 주익에 작용하는 전단하중에 의해 발생하는 전방스파 Pipe의 전단 변형률,  $\epsilon_{f\_bending}$  은 주익에 작용하는 굽힘 모멘트에 의해 발생하는 굽힘 변형률,  $\epsilon_{f\_pipe\_torsion}$  은 전방스파에 작용하는 비틀림 모멘트에 의해 발생하는 변형률을 나타낸다. 그리고  $V, M, T$ 는 각각 주익에 작용하는 전단력, 굽힘 모멘트, 비틀림 모멘트이다.  $G_{f\_pipe}$  는 Pipe의 전단탄성계수이며,  $E_f$  Pipe와 Cap의 탄성계수이다. MSC.Nastran을 이용하여 설계된 전방스파의 선형구조해석을 수행하여 안전여유(Margin of Safety)를 확인하였다.

Table 3. Configuration of Spar Design A

Description	Span 20m, AR20, T-700
Pipe Layup	[Fabric 45 <sub>2</sub> /UD 0]
Cap Layup	[UD 0 <sub>8</sub> ]
Weight (kg)	4.82
Remark	$D = 75 \text{ mm}$ Fail @ 150% Load

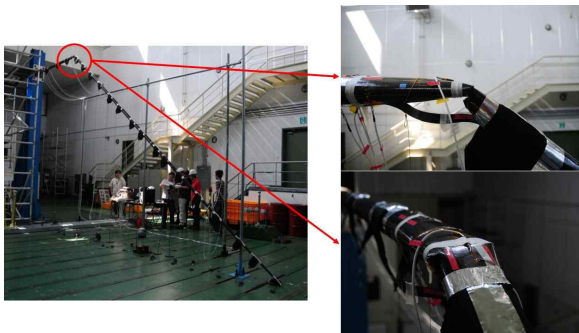


Fig. 5 Static Test Result of Spar Design A

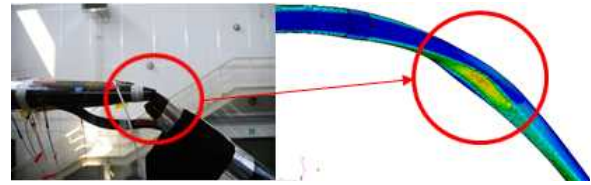


Fig. 6 Nonlinear Analysis for Spar Design A

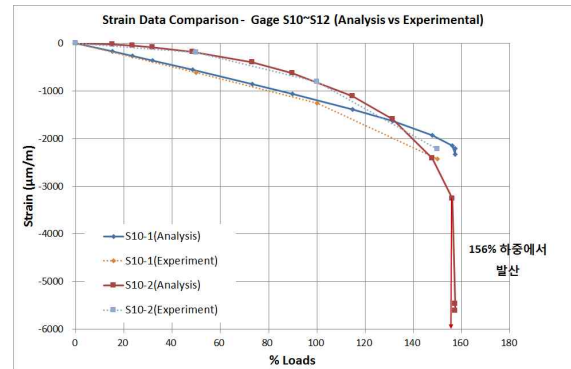


Fig. 7 Strain Data Comparison for Spar Design A - Upper Cap

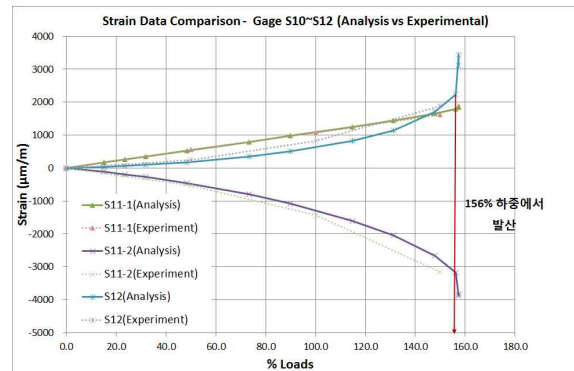


Fig. 7 Strain Data Comparison for Spar Design A - Lower Cap and Pipe

전방스파 A 설계 형상은 Table 1과 같다. 개발 초기에 EAV-3 주익 스파는 20 m이며 세장비는 20 이었다.

A 설계 형상에 대한 설계 검증을 위해 정적 구조시험을 수행하였다. 하중이 크지 않아 추와 스트랩을 이용해 하중을 부가 하였다. 구조시험 도중 150% 하중(목표하중 : 400%)에서 파손이 발생하였다. Fig. 4는 전방스파의 파손 모습을 보여주고 있다. Fig. 6과 Fig. 7의 시험결과 변형율을 보면 Cap의 90방향 변형율(S10-2)과 Pipe 측면의 변형율(S12)이 큰 비선형 거동을 보이고 있음을 알 수 있다. 파손 양상과 시험 변형율을 중



Fig. 8 Static Test for Spar Design B

합해 보면 파손 원인은 다음과 같다.

- ① 스파 측면에 작용하는 압축하중의 증가로 인해 스파 측면의 국부 좌굴 발생
- ② 좌굴로 인해 스파가 원형 형상을 유지하지 못하게 됨
- ③ 형상 변화로 스파의 단면 관성모멘트 감소
- ④ 관성모멘트 감소로 스파 Cap과 Pipe에 작용하는 굽힘응력 증가
- ⑤ Cap과 Pipe의 설계 허용치 초과로 인해 파손 발생

A 설계 형상의 파손 원인 검증은 선형해석으로는 불가능하며, 비선형 해석을 통해 이를 검증할 수 있다. Fig. 5는 A 설계 형상에 대한 비선형 해석 모습을 보여주고 있으며, Fig. 6과 Fig. 7은 파손 부위에서의 비선형 해석 결과와 시험결과를 비교해서 보여주고 있다. 156% 하중에서 해석 변형률이 발산하는 것을 알 수 있는데, 이는 150% 하중에서 파손이 발생한 시험결과와 유사함을 알 수 있다. 시험결과와 해석결과는 10% 내외로 일치하고 있다.

### 2.2.2 전방스파 B 설계 형상

A 설계 형상의 해석 및 시험 결과를 토대로 다음과 같이 세장비가 큰 주익의 설계 과정을 정립하였다.

- ① 간단한 수계산을 통해 스파 설계
- ② 설계된 스파 형상에 대해 좌굴해석 수행하고 필요한 부분 설계 보강
- ③ 스파 비선형 구조해석 수행하고 필요한 부분 설계 보강
- ④ 주익에 대한 질량과 공기력 모델링 수행하고 모달해석 및 플러터 해석 수행

이러한 설계 및 해석 과정을 통해 설계 형상을 최종 확정한다. 구조해석 및 플러터 해석은 MSC.Nastran을 이용하며 특히, 비선형 구조해석은 MSC.Nastran Marc(Sol 600)을 이용하였다. 본 논문에서는 상기 ③번까지만 다루도록 한다.

상기 설계 과정을 통해 스파 설계를 수정하였으며 그 결과는 Table 2와 같다.

Table 4. Configuration of Spar Design B

Description	Span 20m, AR20, T-700
Pipe Layup	Fabric [45/0 <sub>2</sub> ] <sub>s</sub>
Cap Layup	[UD 0 <sub>2</sub> /Fabric 0] <sub>s</sub>
Weight (kg)	8.92
Remark	D = 75 mm No Fail @ 400% Load

Pipe의 일방향(Uni-direction) CFRP 0° 1장을 제거하고 직물(Fabric) CFRP 0° 4장을 추가하였다. Pipe에 직물 CFRP 0° 추가와 두께 증가를 통해 스파 측면의 국부 좌굴을 방지하였다. Pipe의 보강으로 굽힘 강성이 A 설계 형상에 비해 증가하였기 때문에 Cap의 굽힘 강성 감소가 가능하다. 또한, A 설계 형상은 Cap의  $\epsilon_{22}$ 가 크게 예측 되었다. 따라서, Cap의 일방향 CFRP 0° 8장을 일방향 CFRP 0° 4장과 직물 CFRP 0° 2장으로 수정하여 굽힘 강성을 감소시키고 2 방향 강도를 증가 시켰다. 설계 수정으로 인해 A 설계 형상에 비해 중량이 85% 증가하였다.

설계 검증을 위해 정적 구조시험을 수행하였으며 Fig. 8과 같다. 목표 극한하중인 400% 하중에서 파손이 발생하지 않음을 확인하였다. Fig. 9와 Fig. 10은 주요부위의 비선형 해석결과와 시험결과를 보여주고 있다. 시험과 해석의 변형률이 10% 내외로 일치하고 있음을 알 수 있다.



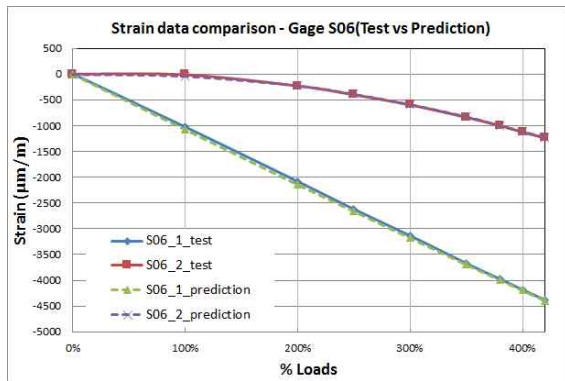


Fig. 10 Strain Data Comparison for Spar Design B – Upper Cap

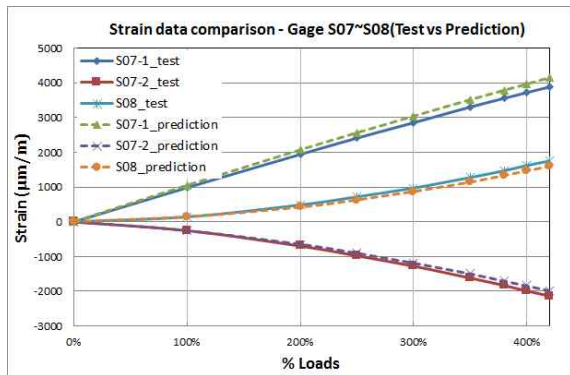


Fig. 11 Strain Data Comparison for Spar Design B – Lower Cap and Pipe

### 2.2.3 전방스파 C 설계 형상

B 설계 형상은 Pipe 측면의 국부 좌굴을 막기 위해 Pipe의 두께를 증가시켜 중량이 많이 증가하게 되었다. 이는 효율적인 설계라 할 수 없다. 중량 증가의 가장 큰 원인은 스파 측면의 국부 좌굴이다. 따라서 스파 측면의 두께 증가가 아닌 다른 효율적인 방법을 통해 국부 좌굴을 방지할 필요가 있다.

좌굴 방지의 한 방법으로 Pipe 내부에 보강재를 삽입하여 스파 측면의 국부 좌굴을 막는 방법이 과거 인간동력항공기인 Daedalus 설계에 사용된 적이 있다[5]. 이를 적용하여 스파 내부에 로하셀 폼(Lohacell Foam)/CFRP 샌드위치 벌크헤드(Bulkhead)를 삽입하였다. Fig. 11의 왼쪽이 제작된 벌크헤드이며 오른쪽은 실제 스파 내부에 장착된 모습을 보여주고 있다.

설계 결과는 Table 3과 같다. 벌크헤드 삽입으로 Pipe에 적용된 직물 CFRP 0° 4장을 2장으로 줄일 수 있게 되었다. 벌크헤드는 굽힘 모멘트가

큰 부분에는 100 mm 간격으로, 상대적으로 굽힘 모멘트가 작은 부분은 200 mm 간격으로 배치하였다. Pipe의 굽힘 강성이 감소했기 때문에 스파의 굽힘 강성을 유지하기 위해 일방향 CFRP 0° 2장을 Cap에 추가하여 Cap의 굽힘 강성을 증가시켰다. 중량은 B 설계 형상에 비해 19% 감소하였다.



Fig. 12 Spar Design C

Table 5. Configuration of Spar Design C

Description	Span 20m, AR20, T-700
Pipe Layup	Fabric [45/0] <sub>s</sub>
Cap Layup	[UD 0 <sub>3</sub> /Fabric 0] <sub>s</sub>
Weight (kg)	7.21
Remark	D = 75 mm Bulkhead 삽입

### 2.2.4 전방스파 D 설계 형상

C 설계 형상은 효율적인 설계이나 여전히 목표 중량을 만족하지 못하고 있다. 구조 중량 경감을 위해 T-700급 CFRP 복합재료를 T-800급 CFRP 복합재료로 변경하였다. 또한 주익 스파를 20 m에서 18 m로 축소하고, 세장비를 20에서 15로 수정하였다. 주익 스파 감소로 인해 주익 전체 전단력은 같지만 굽힘 모멘트는 9.3% 감소하였다.

설계 결과는 Table 4와 같다. T-800 CFRP는 일방향만 생산되므로 직물 CFRP는 설계에 사용하지 않았다. Pipe에 적용한 직물 CFRP 45° 2장 대신 일방향 CFRP ±45° 1장으로 수정하였다. 또한 직물 CFRP 0° 2장을 T-800 일방향 CFRP 0° 2장과 90° 2장으로 수정하였다. Cap의 경우, 일방향 CFRP 6장은 그대로 유지하고 직물 CFRP

0° 2장을 일방향 CFRP 90° 2장으로 수정하였다.

설계에 사용한 T-700과 T-800 CFRP 복합재료의 두께 및 밀도는 Table 5와 같다. Table 5를 적용하여 계산하면 중량이 C 설계 형상에 비해 26% 감소하게 된다.

Table 6. Configuration of Spar Design D

Description	Span 18m, AR15, T-800
Pipe Layup	UD[0/90/45/-45/90/0]
Cap Layup	UD[0 <sub>3</sub> /90] <sub>s</sub>
Weight (kg)	5.33
Remark	D = 75 mm Bulkhead 삽입

Table 7. Thickness and Density of CFRP

Material	Thickness (mm/layer)	Density (g/cm <sup>3</sup> )
T-700 UD	0.114	1.702
T-700 Fabric	0.190	1.647
T-800 UD	0.103	1.503

주익 스패ن 축소로 인한 굽힘 모멘트 감소, 스파 길이 축소, T-800 복합재료 적용을 통해 중량을 크게 감소하였다. 향후 정적 구조시험을 통해 D 설계 형상을 검증할 예정이다.

### 2.2.5 전방스파 E 설계 형상

중량 감소를 위해 원형 형상이 아닌 Fig. 12와 같은 삼각형 형상의 트러스(Truss) 스파를 설계하였다[6]. 트러스 스파는 인간동력 회전익기인 Gamera II의 블레이드 설계에 사용되었다. 원형 형상 스파와 비교를 위해 편의상 Fig. 12와 같이 Cap과 Pipe로 구분하였다. 원형 형상의 Cap은 굽힘 모멘트와 전단력을 지지하고 사선으로 배치된 판 형상의 Pipe가 비틀림 모멘트를 지지하는 구조이다.

E 설계 형상의 설계 결과는 Table 6과 같다. 중량은 D 설계 형상과 거의 유사한 것을 알 수 있다. Cap은 T-800 복합재료를 적용하였다. Cap은 직경이 작은 CFRP 튜브를 사용하는데, T-800 복합재료를 이용해 제작할 수 있는 튜브의 최소 직경은 10 mm 이다. 직경 10 mm 이하의 CFRP 튜브를 사용하면 중량을 더 줄일 수 있으나 제작의 어려움으로 중량을 줄이는데 한계가 있다.

Pipe 설계에는 좌굴 방지를 위해 로하셀 폼/CFRP 샌드위치 구조를 사용하였다. 제작상의 어려움으로 Pipe에는 T-800 복합재료를 적용하기 어려울 뿐만 아니라 오토클레이브(Autoclave)를 사용하여 제작할 수 없다. 트러스 스파는 여러 가지 제약 사항이 있음에도 불구하고 중량은 D 설계 형상과 크게 차이 나지 않는다. 그러므로 트러스 형태의 스파는 매우 효율적인 구조라 할 수 있다. 제작상의 어려움과 높은 제작비용은 해결해야 할 과제이다.

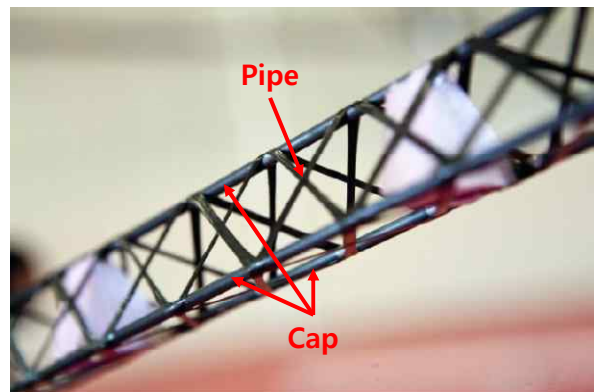


Fig. 13 Truss Type Spar - Spar Design E

Table 8. Configuration of Spar Design E

Description	Span 18m, AR15
Pipe Layup	[Fabric0 <sub>2</sub> /Foam 5mm/ Fabric0 <sub>2</sub> ]
Cap Layup (T-800)	UD [0 <sub>2</sub> /90/0 <sub>3</sub> /45 /-45/0 <sub>3</sub> /90/0 <sub>2</sub> ]
Weight (kg)	5.53
Remark	Triangle/Truss 형상

## 3. 결 론

본 논문에서는 고고도 장기제공 전기동력무인기 주익 스파 설계 Trade-off 연구에 대해 간략히 설명하고 그 결과를 제시하였다. 고 세장비를 갖는 주익 스파에 대한 설계/해석 과정을 확립하고 이를 적용하였다. 주익의 형상 변경을 통한 굽힘 모멘트 감소, 스파 길이 축소, 스파 내부 벌크헤드 삽입, T-800급 CFRP 복합재료의 사용을 통해 중량을 최소화한 D 설계 형상을 최적화된 경량 주익 스파로 결정하였다. 최종적으로 시제품을 제작해 시험평가를 거쳐 이를 고고도 장기

체공 무인기 설계에 적용할 예정이다.

## 후 기

본 연구는 기초기술연구회 “고고도 장기체공 전기동력무인기 기반기술 연구” 사업 수행결과의 일부이며, 지원에 감사 드립니다.

## 참고문헌

- 1) Ross, H., "Fly around the World with a Solar Powered Airplane," Member of the Solar Impulse Team, Germany.
- 2) Najafi, Y., "Design of a High Altitude Long Endurance Solar Powered UAV SPACOM (Solar Powered Aerial Communicator)," M.S. Thesis, Department of Mechanical & Aerospace Engineering, San Jose State University, 2011.
- 3) Frulla, G. and Cestino, E., "Design, Manufacturing and Testing of a HALE-UAV Structural Demonstrator," Composite Structures, Vol. 83, 2008, pp. 143~153.
- 4) "Federal Aviation Regulation (FAR), Part 23 - Airworthiness Standards : Normal, Utility, and Acrobatic Category Airplanes", Federal Aviation Administration, 2009, pp.200~201.
- 5) [http://aerosociety.com/Assets/Docs/About\\_Us/HPAG/Magazine/HP\\_daedalus.pdf](http://aerosociety.com/Assets/Docs/About_Us/HPAG/Magazine/HP_daedalus.pdf)
- 6) Berry, B., Bowen-Davies, G., Gluesenkamp, K., Kaler, Z., Schmaus, J., Staruk, W., Weiner, E. and Woods, B.K.S., "Design Optimization of Gamera II : a Human Powered Helicopter," 2012.