

인공위성 본체 복합재료 샌드위치 플랫폼 및 튜브 스트럿 구조물의 설계 및 제작

노희석* · 최홍섭* · 하재선* · 손원기*, 김 철**, 이주훈***

Design and Fabrication of Composite Sandwich Payload Platform and Strut Tubes for Satellite Main Body Structures

Key Words : 복합재료, 하니콤, 샌드위치 판넬, 튜브 스트럿, 우주환경, M40J

ABSTRACT

본 연구에서는 다목적 실용위성 2 호기에 적용된 금속 구조물 중 알루미늄 샌드위치 패널 구조인 탑재체 플랫폼과 튜브 스트럿(tube strut) 구조에 복합재료 응용기술을 적용하였다. 복합재료 구조로의 대체 설계에서도 관성하중 및 음향진동등과 같은 극심한 발사환경과 더불어 운용하게 될 우주 열환경을 고려하였다. 연구의 목적은 금속소재보다 비강도, 비강성이 우수한 복합재료를 위성 구조물에 사용함으로써 무게를 경량화함에 있다.

1. 서 론

금속합금이나 단일성분, 균질성 재료와는 다르게 두 종류 이상의 구성재료가 거시적으로 각각의 특성을 유지하면서 각각의 물성만으로는 얻을 수 없는 우수한 물성을 서로 보완적으로 이루도록 인위적으로 만들어진 재료가 복합재료이다. 복합재료의 특성은 기존 소재에 비해 비강도 및 비강성이 매우 높아 항공, 우주, 선박, 철도, 자동차, 전자 그리고 스포츠용품 등에 이르기까지 여러 분야에서 사용이 점차 확대되고 있다.

본 연구에서는 다목적 실용위성 2 호기에 적용된 금속 구조물 중 알루미늄 샌드위치 패널구조와 알루미늄 튜브 스트럿 구조를 복합재료 샌드위치 패널과 복합재 튜브 스트럿 구조물로 각각 대체하여 설계요구조건을 만족시키며 무게를 경량화 하였다.

최근 국내 위성체 제작 현황은 all metal (aluminum) 본체 구조물만 제작 운용중이나 선진국의 경우 많은 부분 복합재료를 적용하여 발사

및 운용비용을 절감하고 있으며 발사체나 우주왕복선의 주구조물 뿐만 아니라 우주에서 장기간 체류하여 운용되는 우주정거장 등의 구조물에도 그 적용이 확대되어 응용이 고도화 되어 있는 상태이다. 우리나라도 항공산업의 수행으로 축적된 복합재료 응용기술을 우주기술에 접목하여 선진국의 기술수준에 도달할 수 있도록 복합재료의 적용이 확대될 필요성이 우주개발 진입과 함께 점차 대두되고 있다. 현 위성체 구조물에서는 샌드위치 플랫폼(platform), closure panel 및 튜브 지지구조물이 중요 교체 대상중의 하나로 고려되고 있으며 향후에는 각봉이나 원통형 튜브 등을 사용하는 트러스(truss) 구조물이 크게 늘 것으로 기대되므로 이에 대한 선행연구가 필요하리라 판단된다.

2. 우주용 복합재료 특성

우주용 복합재료는 우주환경 특성상 자외선, 방사선, 태양광선 등의 방사에너지원에 대한 우수한 내성 및 진공상태에서의 outgassing 의 최소화, 고속으로 비행하는 우주 분진 등에 의한 내마모 성능이 우수하여야 하고 위성체나 우주 구조물의 특성에 따라 열전달 특성이 극히 우수하거나 단열성이 우수한 요구조건 등에 따라 그 응용부위를 달

* (주)대한항공 한국항공기술연구원

** 경북대학교 기계공학과

*** 한국항공우주연구원

리하고 있다

항공용 복합재료와 우주용 복합재료는 서로 다른 운용환경을 갖는다. 항공용인 경우 -30~100°C 온도범위의 대기권 내에서 사용되며 내구성과 작은 수분흡수, 그리고 피로저항특성 등이 요구된다. 우주용 복합재는 -100~150°C 온도범위의 진공상태에서 운용되며 원자산소(atomic oxygen), 자외선/우주선, 극심한 온도구배 환경 및 미세 운석 파편 등의 외부 충격에 노출될 수 있다.

3. 위성체 복합재 샌드위치

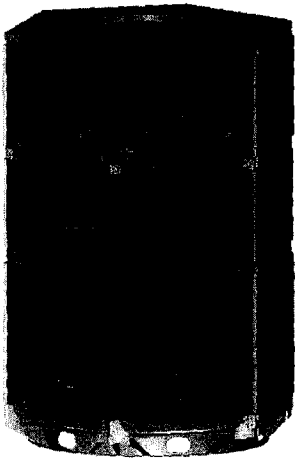


Fig. 1 CATIA configuration of KOMSAT2 bus structure

Fig. 1은 다목적 실용위성 2 호기의 bus structure 를 나타내고 있으며 탑재체 모듈에서 하부 플랫폼이 설계 대상이다. 알루미늄 외피를 갖는 기존의 샌드위치 패널 구조를 복합재료 외피의 샌드위치 구조로 대체하여 중량감소 효과와 함께 우주구조물 적용으로의 설계검증을 목적으로 한다.

3.1 하니콤 샌드위치 보의 무게 최적화

샌드위치 패널 구조설계는 무게, 강도 및 강성 등이 주어진 목표대로 최적화 되는 과정의 수행이라 할 수 있다. 구조물 설계에 적용되는 수많은 제한조건 및 변수등을 최적화하는 것은 복잡하고도 많은 소요비용을 필요로 하는 것이 일반적이기 때문에 본 연구에서는 보(beam) 이론으로부터 중량을 최소화 하기 위한 최적화 과정을 수행하였다.

기존의 알루미늄 외피로 이루어진 샌드위치 패널을 복합재 외피로 대체하여 강성을 같게 하였을 때 최소중량 조건으로부터 얻어지는 심재 및 외피의 두께를 계산하고자 한다. 폭 20cm, 길이 1m 의 단순지지 보 가운데 외부하중 P 가 작용한다고 가정하자. 샌드위치 보의 굽힘강성은 Eq.(1)과 같으며 근사식은 Eq.(2)와 같다. 전단강성은 Eq.(3)과 같이 표현되며 $c \gg t$ 라는 조건하에 Eq.(4)와 같이 쓸 수 있다.

$$EI_{eq}(c, t) = 2E_{face} \cdot \frac{b \cdot t^3}{12} + E_{core} \cdot \frac{b \cdot c^3}{12} + E_{face} \cdot \frac{b \cdot t(c+t)^2}{2} \quad (1)$$

$$EI_{eq}(c, t) = E_{face} \cdot \frac{(b \cdot t \cdot c^2)}{2} \quad (2)$$

$$GA_{eq}(c, t) = \frac{b(c+t)^2}{c} \cdot G_{core} \quad (3)$$

$$GA_{eq}(c, t) = b \cdot c \cdot G_{core} \quad (4)$$

외부 집중하중 P 에 의한 가운데의 처짐은 δ 로 표기되며 이때 보의 처짐강성은 Eq.(5)와 같다. 기존 설계에서 외피의 두께는 .032in, 심재의 두께는 1.4in 였으므로 알루미늄 외피 샌드위치 보의 처짐강성값을 구할 수 있으며 이를 Eq.(5)와 같다고 할 때, 복합재 외피의 두께 t 와 심재 두께 c 의 변수를 이용해 Fig. 2 의 강성 곡선그래프를 얻을 수 있다. 보의 중량과 관련된 목적함수는 Eq.(6)과 같으며 변수 t 와 c 를 갖는 함수이다. 이는 Fig. 2 에 평행한 직선들로 표현되어 있다.

$$P/\delta(c, t) = \left[\frac{P^3}{B_1 \cdot EI_{eq}(c, t)} + \frac{t}{B_2 \cdot GA_{eq}(c, t)} \right]^{-1} \quad (5)$$

$$W(c, t) = (2 \cdot t \cdot \rho_{face} + c \cdot \rho_{core}) \cdot g \cdot b \cdot l \quad (6)$$

주어진 목적함수와 강성조건이 일치하는 점을 찾는 것이 최적화 과정에서 얻고자 하는 결과이다. 계산을 통해 얻어진 최적화 된 심재의 두께는 1.98in, 복합재 외피의 두께는 0.015in 이다. 형상관리 측면에서 심재의 두께, 1.98in 는 큰 형상변경을 요구하고 있음을 알 수 있다. 따라서 Fig. 2 의 강성조건 그래프로부터 심재 1.6in, 외피의 두께를 0.023in 에 해당하는 [-60/60]₃ 적층을 최적해로 선택하여 중량을 비교해 본 결과 알루미늄 외피 구조에 비해 37.4% 중량감소효과가 있음을 확인하였다. 최적해로 선택된 샌드위치 적층구조는 해석을 통하여 적용가능성을 확인하였으나 제작에는 다른 심재의 두께와 외피가 사용되었다. 이유는 두께 및 적층은 심재 자체수급과 기존형상 변경을 최소화 하기 위해 심재의 두께를 1.4in 로 고정시

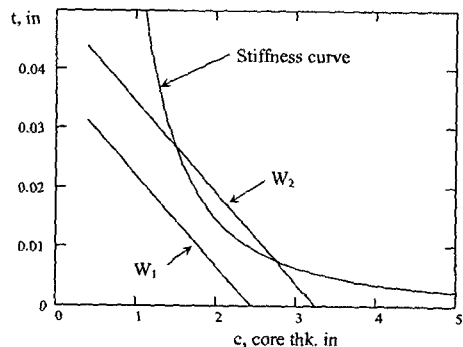


Fig. 2 Curve for a stiffness-weight optimization

킨 뒤 설계 및 제작을 수행했기 때문이다.

3.2 하니콤 샌드위치 판넬 설계

Fig. 3 에는 알루미늄 외피로 설계된 KOMSAT2 위성체의 탑재체 샌드위치 플랫폼의 형상과 단면을 보여주고 있다. 알루미늄 외피인 경우 자재 규격에 한계가 있어 그림에서 보는 바와 같이 splicing 접합으로 제작되어 있음을 알 수 있다. 외피로는 2024-T3 알루미늄과 3.1-1/8-7P(5056) 알루미늄 심재를 사용하였으며 각각의 두께와 물성은 Table 1 에 나타내었다.

Table 1 List of Material properties.

	2024T3	M40J	3.1-1/8-7P(5056)
E_1 (msi)	10.4	31.47	0.906 ksi
E_2 (msii)	"	1.09	0.111 ksi
G_{12} (msi)	3.86	0.75	6.67 ksi
G_{23} (msi)	"	0.49	20.0 ksi
G_{13} (msi)	"	0.75	45.0 ksi
ρ (lb/in ³)	0.101	0.058	3.1(lb/ft ³)

본 연구에서는 앞서 언급한 바와 같이 심재의 재료와 두께를 그대로 사용하여 자재수급과 형상 변경에 대한 위험을 최소화 하였으며 외피의 재료와 두께만을 조절하여 경량화 설계를 추진하였다. 외피 대체 자재로는 M40J/Epoxy 프리프레그를 사용하였다.

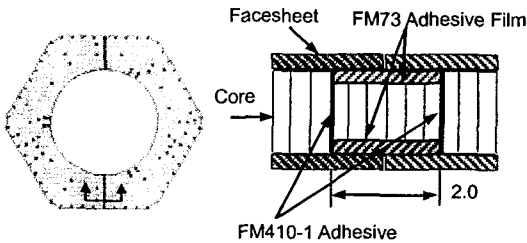


Fig. 3 Configuration of Platform and Section view.

위치 및 자세제어등과 같은 중요한 장비가 장착되는 플랫폼의 특성상 일정한 편평도(flatness)가 유지되어야 하므로 외피를 balanced symmetric 적층으로 하였으며 플랫폼에 작용하는 하중이 중심축에 대하여 대칭이므로 기계적 물성값이 방향과 무관한 준등방성이 되도록 하였다. 위 조건들을 만족시키는 적층판 가운데 ① [0/30/60/90/-60/-30]_s 을 설계에 적용하여 제작하였다. 선택된 적층판은 무게 감소효과가 크지 않으나 강성이 크며 적층각 차이가 적어 층간 잔류응력이 작은 잇점이 있다. 강성등과 무게의 증감을 알루미늄 외피로 이루어진 샌드위치와 비교한 것이 Table 2.에 나열되어 있다.

Table 2 Comparison of sandwich construction.

Parameter	2024T3	①
E_r (msi)	10.4	11.475
t_f (in)	0.032	0.0472
W (lb/in ²)	0.00575	0.00526
H (msi-in)	0.667	1.085
D (msi-in ³)	0.341	0.568
S (ksi-in)	29.29	29.92

H: In-plane stiffness, D:Flexural stiffness, S:Rigidity stiffness

3.3 하니콤 샌드위치 플랫폼 해석

탑재체 하부 플랫폼 외피의 자재를 알루미늄에서 복합재료로 대체한 뒤 전체 모델에 측면 3.5G, 수직방향 10G 의 관성하중이 적용되었다. Load case 는 Table 3.과 같다. 본 해석에서는 정적해석과 모드해석을 통해 복합재 적용 구조물로의 대체설계 가능성을 확인하고자 한다.

Table 3 List of load cases.

Load Case	Load(X,Y,Z)
Case I	(0.0, 3.5G, 10.0G)
Case II	(0.0, -3.5G, 10.0G)
Case III	(3.5G, 0.0, 10.0G)
Case IV	(-3.5G, 0.0, 10.0G)

먼저 정적해석에서 고려되어질 부분은 외피에서는 first ply failure, dimpling, wrinkling 이 있으며 심재에서는 crushing 과 shear 등이 있다. 부위별 손상형태와 그에 따른 해석결과를 Table 4.에 나타내었다. 또한 최적화 과정을 통해 얻어진 심재 1.6in 와 외피[-60/0/60]_s 에 대한 결과도 함께 비교하였다. Table 4 에 표기된 ①,②는 각각 [0/30/60/90/-60/-30]_s, [-60/0/60]_s 적층의 외피 샌드위치 구조를 의미한다.

Table 4 Margin of Safety (M.S.) for each panel.

	Failure Mode	M.S.	
		①	②
Facing	First Ply Failure	High(IV)	High(IV)
	Dimpling	High	High
	Wrinkling	4.64(IV)	2.43(IV)
Core	Core Crushing	2.07(I)	2.27(IV)
	Core Shear	High(III)	High(III)
Fastener	Insert Pullout	1.73(I)	1.50(IV)
Sandwich	Shear Crimping	High	High

모드해석은 어댑터 하단부를 고정한 뒤 Lanczos method 를 이용해 수행하였다. 모드해석시 횡방향 20Hz, 종방향 40Hz 이상이 설계요구사항이

다. Fig. 4 에서는 모드 1 에 대한 결과를 보여주고 있으며 모드 1,2,3 에서 각각 28, 28.8, 그리고 55Hz 의 해석결과를 얻었다. 결과를 통해 알 수 있듯이 복합재구조로의 대체설계는 요구사항을 만족시키고 있다.

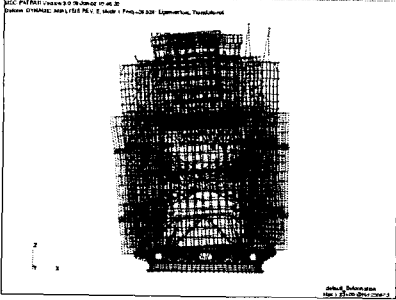


Fig. 4 Normal mode 1 _ f = 28Hz

3.4 제작

샌드위치 판넬은 복합재료 구조물을 제작하는 일반적인 공정인 bonding 으로 제작된다. 복합재료 bonding 공정의 흐름은 detail part 준비/제작, 예비 조립작업, cleaning 및 표면처리, lay-up 작업, 그리고 curing 과 post bond 이후 비파괴 검사로 진행된다. 고정밀 및 고강도의 접착특성을 갖도록 하기 위해서는 접착표면에 기름, 지문 등의 이종 물질이 없어야 하며 표면의 화학적 안정화도 필요하다. 이것이 cleaning 과 표면처리 작업이 필요한 이유이다. 알루미늄 외피를 사용하는 경우에는 acid etching 또는 anodizing 등과 같은 표면처리가 필요하나 프리프레그는 표면처리 없이 바로 lay-up 작업을 수행할 수 있다. 이러한 과정을 거쳐 성형된 판넬은 끝단에서 하니콤 코어로의 수분침투를 막기 위해 kapton film tape 로 밀봉하였다. Fig. 5 에는 성형 후의 샌드위치 판넬 형상을 보여주고 있으며 좌우 가장자리에 insert 를 볼 수 있다.



Fig. 5 Picture of composite sandwich panel.

4. 복합재 튜브 스트럿

다목적 실용위성 2 호기 본체구조물에서 플랫폼 샌드위치 구조물에 걸리는 하중을 longeron 에 전달하여 하중을 분산하는 역할과 구조물의 열변형을 최소화해야 하는 요구조건을 갖는 기존의 알루미늄(aluminum 2024-T81) 튜브를 원통형 탄소섬유 복합재료 튜브로 대체함을 목적으로 하며 이번 연구에서는 복합재 스트럿의 제작공정 개발과 제작성 평가를 위한 sample 제작에 주안점을 두고 설계를 수행하였다.

4.1 설계

스트럿 튜브는 주어진 하중 하에서 스트럿 자체가 파손되지 않도록 충분한 강도를 가져야 할 뿐만 아니라 탑재물들의 전체강성 조건에도 만족하도록 설계되어야 한다. 이러한 조건에 맞게 설계된 기존의 알루미늄 스트럿 튜브를 검토한 결과 강성조건이 더 중요한 설계조건임을 알 수 있었다. 따라서 기존 스트럿 강성값을 기준으로 Gr (M40J)/Ep 튜브의 sizing 을 먼저 수행하고 강도해석을 통하여 설계를 수행 하였다. Fig. 6 에서는 튜브의 단면형상을 보여주고 있다.

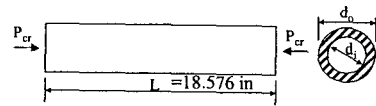


Fig. 6 configuration of tube.

Table 5 에 보여지는 것과 같이 알루미늄 튜브의 강성을 갖도록 설계하기 위해 laminate lay-up 구성을 0°는 60%, 45°는 40% 사용하였으며 90°는 사용하지 않았다. 튜브와 fitting 이 연결되는 튜브의 내부직경(Di)은 고정시킨뒤, 요구되는 단면적으로부터 최소 외부직경(Do)을 구한다. 이때 계산되는 튜브의 두께를 프리프레그 한장의 두께인 0.00394in 로 나누어 계산하면 20 장의 요구 적층수를 구할 수 있다. 이렇게 해서 최종적으로 구성된 lay-up 은 $\textcircled{0}_2/45/-45/0_2/-45/45/0$ S 이다. 알루미늄 튜브와 비교를 위해 계산된 값을 Table 3 에 적어 놓았다.

본 연구에서 복합재 스트럿 튜브의 강도 해석은 스트럿 튜브 자체에 대해서만 수행하였고, 기존의 알루미늄 스트럿 해석이 수행되고 입증된 lug fitting, adhesive, fastener 등은 본 해석에서 제외되었다. 복합재 튜브 해석은 원통형 튜브 이론에 의하여 최대 변형률을 산출하고 허용 변형률에 따라 안전계수를 계산하여 Table 6 에 정리하였다.

Table 5 Properties of tube section.

Property	AL 2024T81	③
D_i (inner dia.)	0.875 in	0.875 in
D_o (outer dia.)	1.125 in	1.033 in
t (Thk)	0.125 in	0.079 in
A (in ²)	0.3927	0.23611
I (in ⁴)	0.049854	0.027034
J (in ⁴)	0.0997	0.05407
EA (lbs)	4.123E+6	4.763E+6
EI (lbs-in ²)	5.235E+5	5.453E+5
GJ (lbs-in ²)	3.998E+5	1.978E+5

Table 6 Margin of safety for composite tube.

Check list		M.S.
Column Check		8.97
Laminated Tube Analysis	Tension	9.51
	Shear	High
	Combine	8.36

4.2 제작

튜브 형상의 제작에는 필라멘트 와인딩이나 wrapping 공정이 선택적으로 사용된다. 본 과제 제안시에는 필라멘트 와인딩 방법 적용을 검토 하였으나 수지 체적비가 높고 기공 발생 가능성이 많다는 단점과 적용 대상의 직경과 길이가 매우 짧고 두께가 얇아 wrapping 방법으로 복합재료 튜브를 제작하게 되었다. Fig. 7 은 최종적으로 제작된 복합재료 튜브 스트럿을 보여주고 있다.



Fig. 7 Picture of composite tube strut.

5. 결론

현재 위성체 구조개발 기술단계에서 일반적으로 사용되어지는 재료는 알루미늄이다. 본 연구에서는 복합재료를 위성체를 비롯한 우주구조물로써의 적용을 위해 이미 설계검증이 되어 있는 알루미늄 구조물 중 일부를 복합재료로 대체하여 설계하였다. 플랫폼에서는 알루미늄 외피를 복합재료로 대체하여 해석을 수행하였으며 감소된 질량뿐만 아니라 설계요조건등도 만족함을 알 수 있었다. 본 연구에서 접근한 단순화된 샌드위치 구조물의 최적화 결과에서도 볼 수 있듯이 무게감소 효과는 더욱 컸으며 margin of safety 결과에서 볼 수 있듯이 설

계적용으로의 가능성을 보여주었다. 복합재 튜브 설계에서는 제작공정 개발과 제작성 평가를 위한 sample 제작에 초점을 두었으며 이와 유사한 튜브 구조물에 복합재료를 적용하면 경량화에서 오는 경제적 이익뿐만 아니라 기술적 장점도 활용할 수 있을 것으로 판단된다.

추후에는 새로 선택된 high modulus Gr/Ep, M40J 에 대한 시편시험을 통해 재료 물성치 및 허용치에 대한 상세한 평가가 수행되어야 하고, 이러한 data 를 근거로 실제 위성구조물 설계시 다루어지는 다양한 load case 와 요구되는 해석 체크 사항들을 보다 정확히 접근할 필요가 있다.

참고문헌

- (1) Acceptance Criteria for Sandwich Panels, AC04, ICBO Evaluation Service, Inc., July 2001.
- (2) Space Engineering; Mechanical-Part 8: Materials, European Cooperation for Space Standardization, ECSS-E-30 Part 8A, 25 April 2000.
- (3) European Space Agency, ESS-03-1202 Issue1, Insert Design Handbook, 1987.
- (4) Process Specification Installation of Bushings in Honeycomb Sandwich Panels, PR10-42B, TRW System Group, 1993.
- (5) Advanced Composites Handbook, D6-53993, Boeing, 1989.
- (6) Advanced Composites Design Handbook, D6-44714, Boeing, 1978.
- (7) Boeing Process Specification, Boeing, 1985.
- (8) Carl. T. Herakovich, Mechanics of Fibrous Composites, Chapter 10 Laminated Tubes, 1998, John Wiley & Sons, Inc. (- tube analysis-)