

論文

J. of The Korean Society for Aeronautical and Space Sciences 42(8), 629-639(2014)  
 DOI:<http://dx.doi.org/10.5139/JKSAS.2014.42.8.629>

격자-강화된 다기능 복합재 구조체의 방사차폐에 관한 연구

장태성\*, 이주훈\*\*, 서현석\*\*\*\*, 현범석\*\*\*, 김택영\*\*\*\*\*, 서정기\*

A Study on Radiation Shielding for Grid-stiffened Multi-Functional Composite Structures

Tae Seong Jang\*, Juhun Rhee\*\*, Hyun-Suk Seo\*\*\*\*, Bum-Seok Hyun\*\*\*,  
 Taig Young Kim\*\*\*\*\* and Jung Ki Seo\*

Satellite Technology Research Center, KAIST\*

Korea Aerospace Research Institute\*\* ,\*\*\*, Korea Aerospace Industries, Ltd\*\*\*\*  
 Dept. of Mechanical Eng., Korea Polytechnic University\*\*\*\*\*

ABSTRACT

This paper deals with an alternative multi-functional structures by using grid-stiffened composite structure with excellent bending stiffness and lightweight characteristics which is capable of easy embedding of electrical/electronic circuitry into structure. The enhancement of thermal conduction capability is made by the application of pitch-based carbon fiber. The lightweight radiation spot shielding technique is also proposed for multi-functional structures without conventional housing and the effectiveness of selective radiation shielding is validated through the proton irradiation test.

초 록

강성이 우수하고, 경량으로 제작이 가능한 격자강화 복합재 구조체를 다기능 구조체의 기층구조로 적용함으로써, 전기전자회로를 용이하게 내장할 수 있으며 방사차폐 특성을 갖춘 다기능 구조체에 대한 설계 및 제작을 수행하였다. 피치계열 탄소섬유 복합재료의 적용을 통해 열전달특성을 향상시키고, 전자회로의 하우징 구조물이 없어도 우주방사환경에 충분한 내구성을 갖도록 경량 국부 강화 방사차폐 방법을 제안하고, 양성자 조사시험을 통하여 선택적 방사차폐의 효과를 검증하였다.

**Key Words** : Multi-functional Structures (다기능 구조체), Spacecraft (인공위성), Grid-stiffened Composite Structures (격자-강화 복합재 구조체), Mass Savings (질량 절감), Lightweight Composite Materials (경량 복합재료)

1. 서 론

다기능 구조체(Multi-functional structure, MFS) 기술은 구조물 본래의 하중지지 기능에 전기전

자, 열전달, 방사차폐 등의 기능을 통합하여 집적한 것으로, 무게 및 부피의 절감을 극대화 할 수 있어 위성 경량화 및 소형화 방안으로 많은 관심을 받아왔다. 무엇보다도 구조물에 전기전자회로

† Received: February 27, 2014 Accepted: July 22, 2014

\*\* Corresponding author, E-mail : jrhee@kari.re.kr

<http://journal.ksas.or.kr/>

pISSN 1225-1348 / eISSN 2287-6871

를 직접 통합함으로써, 전자회로를 지지하고 보호하는 하우징(Housing) 구조물을 더 이상 사용하지 않으며, 이로 인해 위성의 부피감소와 질량 절감이라는 이득을 함께 제공한다.

NASA 뉴밀레니엄 프로그램(NMP)의 일환으로, DS1 위성에 다기능 구조체 기술이 탑재되어 성공적인 우주검증이 수행[1]된 이후, 지난 십여 년간 다양한 개념의 다기능 구조체가 연구되어 왔다[2~11]. 국내에서도 하니컴 샌드위치 패널이나 격자-강화 패널에 전자회로를 장착하고 열전달 및 방사차폐를 구현하는 것을 특징으로 하는 다기능 복합재 구조체 개발 노력이 있었다[8~11].

그간의 연구는, 전기전자 기능을 통합하는 방식에 있어, 하니컴 샌드위치 패널 위에 전자회로를 부착시키거나, 하니컴 샌드위치 패널 내부에 전자회로를 내장하는 접근을 주로 시도하였다. 하니컴 샌드위치 패널의 한쪽 면에 전자회로를 부착하는 방법[1~4]은, 전자회로에서 발생된 열을 다른 면으로 전달하여 심우주로 소산시킴에 있어, 하니컴 코어의 매우 작은 단면적으로 인해 열전달에 불리한 점이 지적되었다. 개선책으로 코어 필링(core filling)과 같은 개념으로 열전달을 촉진하기 위한 추가적인 접근이 제안되었으나 [2], 이로 인해 필연적인 무게 증가가 수반된다. 또한 패널 표면에 부착된 전자회로로 인하여 해당표면의 활용도가 떨어지는 점도 지적된다. 한편 하니컴 샌드위치 패널의 코어를 일부 제거하고 이 부분에 전자회로를 내장하는 방식[6~9]이 시도되었는데, 전자회로의 크기나 구성에 따라 하니컴 샌드위치 패널을 맞춤형으로 제작하여야 하므로, 이에 따른 다기능 구조체 제작비용이 증가된다는 단점이 지적되었다.

이러한 점 때문에 맞춤형 패널보다는 전자회로의 통합이 용이한 범용 구조 패널의 적용이 요구되었다. 또한 현재까지 제시된 다기능 구조체 연구는 전자회로를 구조체에 통합할 수 있는 가능성을 충분히 제시하였으나, 실험적 시도에 중점을 두었기 때문에 소규모 전자회로를 대상으로 한 다기능 구조체의 구현이 주류를 이룬다. 만일 구조체가 전자회로의 내장 또는 부착을 위하여 다수의 일정한 공간을 자연적으로 제공하고, 전자회로가 접촉하는 부재를 통해 심우주로의 직접적인 열전달이 가능하다면, 이는 다기능 구조체의 효과적인 대안이 될 수 있을 것이다.

이러한 고려에서 출발하여, 본 연구는 전자회로의 집합적인 수용이 용이하도록, 구조체를 격자 구조로 제작하고 개별 격자마다 단수 또는 복수 개의 전자회로를 접착 또는 장착할 수 있는

다기능 구조체 대안을 제시하고자 한다. 이를 위해 격자로 강화된 복합재 구조체를 설계 및 제작하고, 다수의 전자회로를 격자-강화된 복합재 구조체에 부착하여 다기능 구조체를 완성하였다. 한편 하우징이 제거된 전자회로를 우주방사환경으로부터 보호하기 위해서는 다기능 구조체의 방사차폐 기능이 필수적으로 요구된다. 이를 위하여 경량 복합재료와 고밀도 텅스텐의 조합에 의한 다물질 다층 방사차폐재를 설계 및 제작하고 다기능 구조체에 통합하여, 방사차폐 성능을 실험적으로 평가하였다.

## II. 격자-강화된 다기능 구조체 설계

### 2.1 다기능 구조체 기층 설계

기존의 연구[1~9]가 하니컴 코어 샌드위치 패널을 다기능 구조체의 기층(Substrate)으로 활용한 데 비해, 본 연구에서 제안하는 다기능 구조체는 격자-강화된 복합재 구조패널(Grid-stiffened composite panel)을 기층으로 한다. 격자-강화된 복합재 패널을 기층으로 하여 구성된 다기능 구조체 전체 시스템 개념도를 Fig. 1에 제시하였다.

격자-강화된 복합재 구조는 면재와 강화격자로 구성된 평판 구조물로서, 가볍고, 굽힘 강성이 우수하여 발사체, 위성 등 우주용 구조 부재로 적용되어왔다. 대표적인 위성 적용사례로 미국의 달레도선 Clementine의 태양전지판에  $91 \times 152 \text{cm}^2$  크기의 등방 격자강화(Iso-grid stiffened) 복합재 패널이 사용된 바 있다[12]. 격자의 형상은 삼각이나 사각 등이 될 수 있으며, 격자의 간격, 두께, 높이 그리고 면재의 두께와 같은 기하학적 변수의 조합에 의해 패널의 강성과 강도가 제어

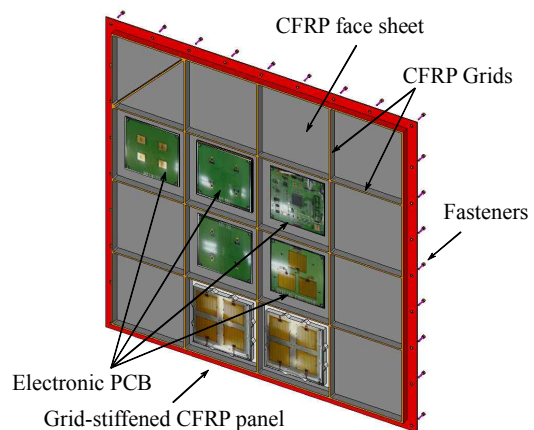


Fig. 1. Conceptual design of grid-stiffened multi-functional composite structures

된다. 본 연구의 다기능 구조체는, 전자회로를 장착하기 위한 공간을 인위적으로 제작하지 않고, 일정 간격으로 배치된 격자에 의해 생성된 복수 개의 공간에 복수 개 전자회로의 집합적 배치를 가능하게 한다.

격자-강화된 복합재 패널의 주요 구성품과 소재를 Fig. 2와 Table 1에 각각 나타내었다. 패널의 전체 크기는 860×890×21.14mm<sup>3</sup>으로 설계되었다. 면재1과 격자는 팬계열(PAN-based) CFRP인 M55J 소재를 이용하여 동시경화 공정으로 제작하고, 면재2는 패널 전체의 열전달을 향상시키기 위하여 피치계열(Pitch-based) CFRP인 YS95A 소재로 제작한다. 기계적 접속이 이루어지는 부분을 강화하기 위한 더블러(Doubler)의 제작에는 고강도 CFRP인 T700 소재를 적용한다. 앞서 수행된 연구[10]를 통하여, 전장품을 장착한 복합재 패널의 고유진동수는 69Hz에 달하고, 안전여유는 0보다 크며, 좌굴지수는 1보다 커서 구조적 요구조건을 모두 충족함을 이미 확인한 바 있다.

피치계열 CFRP는 연신이 작고, 취급성이 좋지 않아 파단이 쉽게 발생할 수 있어, 교차점 및 곡

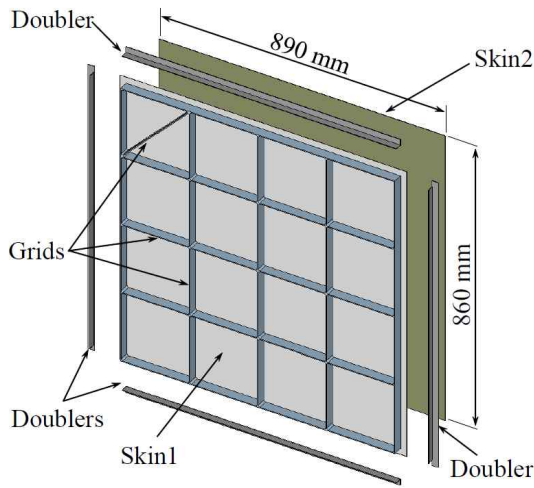


Fig. 2. Configuration of grid-stiffened structure

Table 1. Materials used for structural panel

Item	Material	Geometry
Grid	M55J/#3800 (Toray) Prepreg UD tape	[±45,0 <sub>n</sub> ] <sub>s</sub> Height=20mm Thicknss=3mm
Skin1	M55J/#3800 (Toray) Prepreg UD tape	[0/90/90/0] Thickness=0.48mm
Skin2	YS95A/RS36 (Tencate) Prepreg UD tape	[0/90/+45/-45/0/90] <sub>s</sub> Thickness=0.66mm
Doubler	T700/#2500 (Toray) Prepreg UD tape	[0/90/0/90/0] <sub>s</sub> Thickness=0.95mm

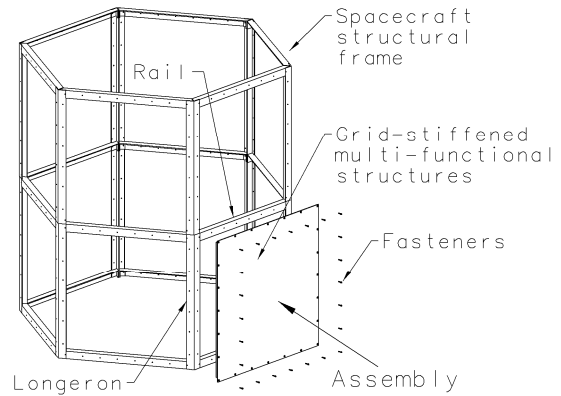


Fig. 3. Mechanical interface concept of MFS

률 부위를 갖는 부재의 제작에 적용하는데 어려움이 있다. 따라서 열전도를 향상시키기 위한 면재2의 제작에만 적용하되, 제작 후 별도로 면재1과 접착시키는 공정을 계획하였다. 열전도도가 우수한 피치계열 CFRP를 면재 제작에 적용함으로써, 전자회로에서 발생된 열원이 다기능 구조체 면재 사방으로 신속히 전달되어 심우주로 복사되도록 한다. 서로 다른 소재를 접착할 때, 열팽창계수의 차이로 인한 잔류응력이나 열변형을 억제하기 위해 상온경화가 유리하다. 작은 면적의 더블러는 별도 제작 후, Hysol사의 EA9321 접착제를 적용하여 면재1 및 격자와 상온경화를 통해 접착하도록 하였다. 반면에 넓은 면적의 면재1과 면재2는 상온에서 경화할 경우, 현실적으로 기공의 함유에 따른 접착강도 저하가 더 큰 문제로 판단되어 Cytec사의 FM73 필름 접착제를 이용하여 125℃ 고온경화 공정으로 설계하였다. 이는 열응력 해석을 통해 패널 전역의 충분한 안전여유가 확인된 결과에 바탕을 둔 것이다.

격자-강화된 다기능 구조체 패널은 닫힘 패널(Closure panel)로서, 위성체 주 하중지지 구조물에 해당하는 Longeron, Rail과 같은 세로부재 및 가로부재에 기계적으로 장착된다. Fig. 3는 격자-강화된 다기능 구조체 패널이 위성체에 접속되는 개념을 나타낸 것이다. 다양한 전자회로를 포함한 복수 개의 다기능 구조체 패널이 위성체에 장착된다면, 상당한 규모의 전자회로를 포함할 수 있어서 공간 활용도를 크게 향상할 수 있다. 아울러 다기능 구조체의 전자회로가 배치된 영역에는, 니켈이나 구리로 구성된 상용 EMI 차폐용 박막 직조물(fabric)을 이용하여 전자회로나 격자 영역을 둘러싸거나 접착하여 전자기간섭의 영향을 억제하도록 설계하였다.

## 2.2 방사차폐 기능의 설계

다기능 구조체에서는 금속으로 구성된 전자장비 하우징이 제거되므로, 우주방사 환경으로부터 전자회로를 보호하기 위한 방사차폐 기능이 필수적으로 요구된다. 이를 위해 Fig. 4에 나타낸 것과 같이, 격자-강화된 복합재 패널 안쪽 면에 하우징을 대신하여 경량 방사차폐 소재를 부착하고, 부착된 방사차폐 소재 위에 전자회로를 위치 시킴으로써, 외부로부터 입사하는 방사환경으로부터 전자회로를 보호하도록 하였다.

외부에서 입사한 하전 입자는, 물질 내 원자 주위 전자에 의해 형성된 전자기장과 상호작용을 반복하며 에너지를 서서히 잃게 되는데, 하전 입자에 대한 저지능은 물질의 원자번호가 높을수록 효과적임이 알려져 있다. 이러한 이유로 텅스텐(원자번호 74)이나 탄탈륨(원자번호 73)이 우주 방사차폐를 위한 물질로 적용되고 있다[13]. 반면에 텅스텐과 같은 고밀도(비중 19.24) 재료는 경량화 관점에서 이롭지 않은 면이 있어서, 적용 두께를 최소화해야 한다. 이러한 점을 고려하여, 경량 재료인 CFRP와 텅스텐 박막(W)의 조합에 의한 경량 다물질 다층 방사차폐재의 적용 가능성을, 기존 연구[8]를 통해 제시한 바 있다. 나아가 본 연구에서는, 다물질 다층으로 방사차폐재를 제작하되, 경량화를 극대화하기 위하여 방사 환경에 민감한 전자소자 영역에만 텅스텐 삽입을 국한하는 국부차폐(Spot shielding)를 시도하였다. 일반적인 전자회로에서 프로세서, 메모리, 집적소자 등 방사능에 민감한 소자에 대해서만 방사차폐를 강화하는 것이 경량화에 훨씬 효과적이기 때문이다.

본 연구에서는, 보수적인 설계에서 적용하는 두께 150mil(=3.81mm) 알루미늄 하우징의 양성자(proton) 차폐능과 등가한 국부 강화 방사

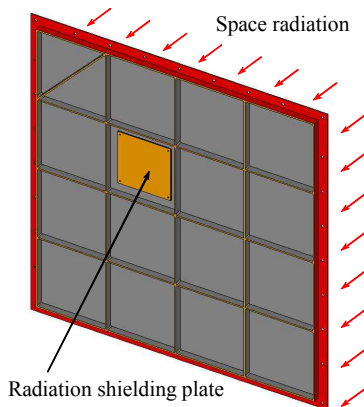


Fig. 4. Placement of radiation shielding plate

차폐 성능을 갖출 것을 요구사항으로 설정하였다. 양성자는 우주궤도에서 위성전자부품에 방사선 효과를 주는 영향력 있는 대표적인 입자이며, 지상에서 실제적으로 조사(irradiation) 시험이 가능한 입자이기 때문이다. 우선, 두께 150mil 알루미늄의 양성자 차폐효과를 분석하기 위하여, 물질 내 비정거리를 해석코드인 SRIM[14]을 이용하여 양성자 에너지 수준에 따른 알루미늄 매질 내 비정거리를 분석하였다. 0°로 입사된 1000개의 양성자 입자의 궤적과 투과 이온의 비율을 각각의 에너지 수준에 대하여 조사하였다. Fig. 5와 Table 2에 제시한 결과를 통해, 150mil 두께의 알루미늄은 약 27.2MeV의 양성자를 차폐할 수 있음을 알 수 있다. 따라서 본 연구에서 제작할 방사차폐판은 27.2MeV의 양성자를 차폐할 수 있어야 한다.

전자회로가 방사차폐판 위에 위치하므로, 전자회로로부터 발생된 열을 신속히 전달하기 위해 열전도도가 우수한 피치계열 CFRP를 적용하여 CFRP/W/CFRP 조합을 설계하였다. SRIM 코드를 이용하여 CFRP/W/CFRP 다물질 다층 구성물에 대한 양성자 비정거리를 분석하고 Fig. 6에

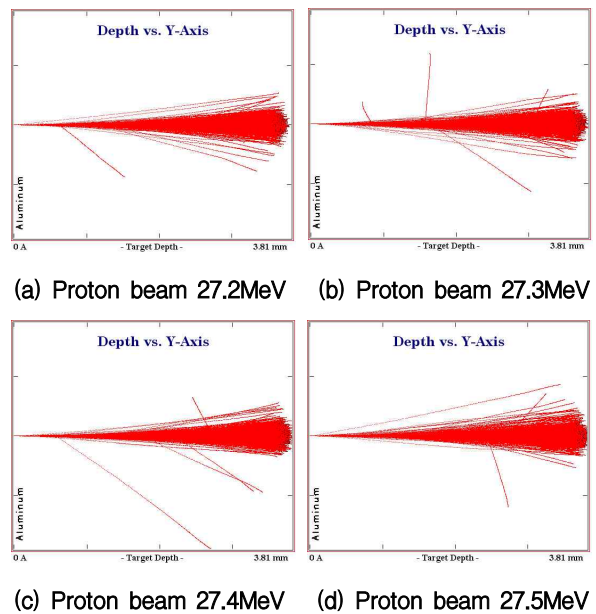


Fig. 5. Proton trajectory in 150mil Aluminum

Table 2. Transmitted ions for 150mil Aluminum

Proton beam energy	Transmitted ions (%)
27.2 MeV	0.00 %
27.3 MeV	0.70 %
27.4 MeV	1.90 %
27.5 MeV	4.90 %

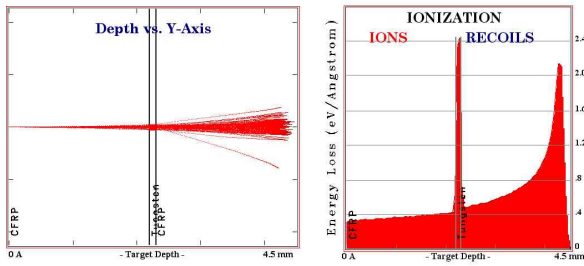


Fig. 6. 27.5MeV Proton trajectory and ionization in CFRP/W(0.1mm)/CFRP layered material

결과를 제시하였다. 추후 실제 양성자 조사시험에서 구성이 용이한 에너지 수준을 고려하여 27.2MeV보다 약 1% 높은 27.5MeV를 양성자 조사조건으로 설정하였다. 적층구성 CFRP(2.2mm)/W(0.1mm)/CFRP(2.2mm)의 총 두께 4.5mm의 국부 강화 방사차폐판에 의해, 27.5MeV로 입사된 양성자가 모두 차폐됨을 확인하였다. 특히 입사된 양성자빔은, 두께 0.1mm의 텅스텐 층을 통과하면서 높은 이온화 에너지를 발생시키며, 4.5mm 근방에서 모두 정지됨을 살필 수 있다.

### III. 격자-강화된 다기능 구조체 제작

#### 3.1 격자-강화된 복합재 패널 제작

격자-강화 복합재 패널의 면재1과 격자를 동시 경화하여 제작하기 위한 지그(Jig)와 치구 블록(Tooling block)을 Fig. 7에 나타내었다. 탄소강으로 제작된 바닥판(Base plate) 위에, 열팽창계수(CTE)가 매우 작은 CFRP로 제작된 두께 5mm의 슬립평판(Slip plate)이 놓여진다. 고온 경화과정 중 계면에서 미끄러짐에 의해 CTE가 큰 탄소강 바닥판의 면내 열변형 영향을 분리하기 위함이다. 슬립평판에는 일정 간격으로 정밀하게 가공된 홈이 위치하며, 탄소강으로 제작된 일련의 핀(Pin)이 홈에 모두 장착된다. AL6061로 제작된 치구 블록이 핀에 모두 끼워짐으로써, 치구블록 간 상대위치가 결정된다. 두 개의 삼각 치구 블록은, 삼각 형상의 격자에 대한 제작 가능성을 확인하기 위해 더해진 것이다. 인접한 치구 블록 사이의 폭 3mm의 틈으로 M55J 프리프레그를 교차하여 적층하고 격자 영역을 형성한다. 적층이 완성된 후 최외곽 치구 블록을 제거하고, 불필요한 바깥 영역 격자 부분을 절단한 후, 다시 댐(Dam) 역할을 하는 치구 블록을 설치한다. 일련의 치구 블록 위에 면재1을 구성하는 M55J 프리프레그를 적층하고, 그 위에 가압용 지그 상판

(Caul plate)를 올려 진공백 성형 후 오토클레이브에서 경화한다. 슬립평판의 낮은 CTE로 인해, 고온경화 과정에서 판에 고정된 치구 블록 간의 상대변위는 매우 작은 대신, 치구 블록 자체는 높은 CTE로 인하여 팽창하면서 치구 블록 사이에 배치된 격자에 강한 압력을 가하는 것이 제작의 핵심이다.

그리고 면재2와 더블러에 대한 제작을 수행한 후, 이들을 동시 경화된 면재1 및 격자와 별도 접착과정을 수행하였다. 패널 가장자리에 기계적 접촉을 위한 홈을 가공하고 부싱(Bushing)을 장착하여 다기능 구조체의 기층인 격자-강화 복합재 패널을 완성하고, 이를 Fig. 8에 제시하였다.

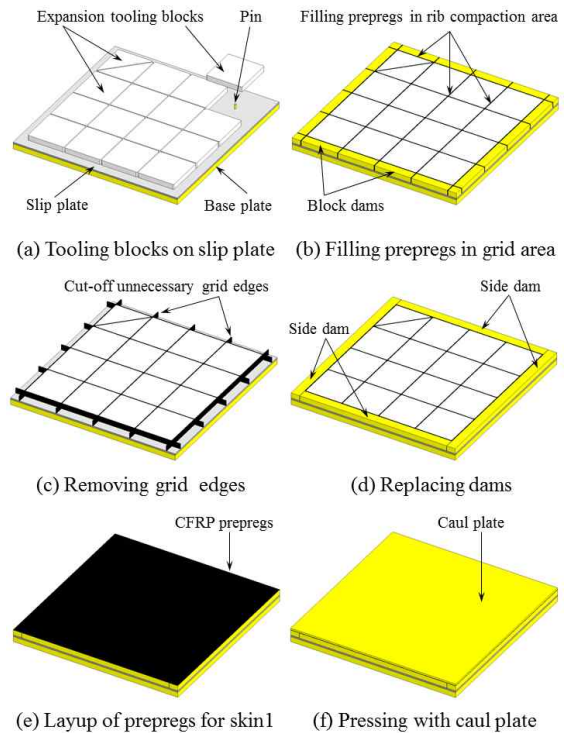


Fig. 7. Manufacturing process for CFRP Panel



Fig. 8. Fabricated grid-stiffened structure

### 3.2 국부 강화 방사차폐판의 제작

국부 강화 방사차폐판을 적용하여, 검증할 회로는 RDB(Radiation demonstration board)로서, 방사선 측정용 센서가 부착되는 위치는, Fig. 9에 나타낸 바와 같이, 전체회로의 일부 영역에 해당한다. 이 영역에 대하여 비중이 매우 높은 텅스텐 박막을 포함하여 방사차폐판을 제작한다.

CFRP/W/CFRP로 구성된 방사차폐판 제작을 위한 다물질 다층 단면도를 Fig. 10에 나타내었다. 면재1, 면재2 및 방사차폐판 전체에 대해 텅스텐이 증착면에 위치하도록 직교적층 순서를 조정하였다. 특히 0.1mm 두께의 텅스텐이 국부 삽입되는 영역 주위로 레진 밀집지역이 발생하지 않도록 같은 두께의 프리프레그가 주위에 적용되도록 하였다.

Figure 11은 방사차폐판의 제작과정을 나타낸 것으로, 텅스텐 박막을 워터젯 가공하고 표면조도 처리를 수행하여, 국부 차폐 강화 영역에 삽입하였다. 복합재료 적층물을 진공백 성형 공정을 통해 경화하고, 설계된 치수에 따라 기계가공을 수행하여 국부 강화 방사차폐판을 완성하였다.

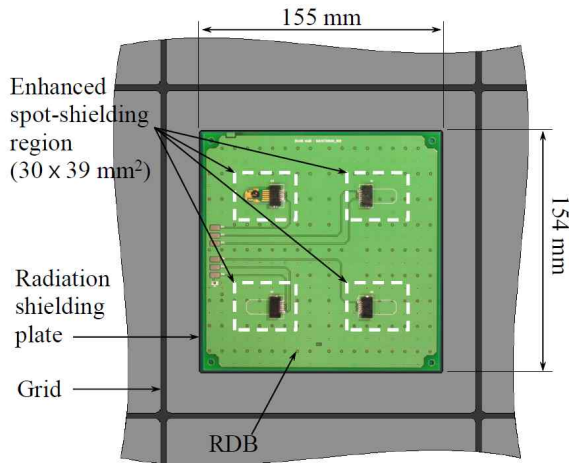


Fig. 9. Enhanced radiation spot shielding region

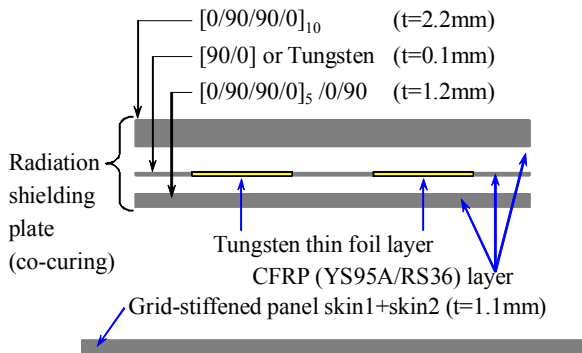


Fig. 10. Configuration of multi-layered plate

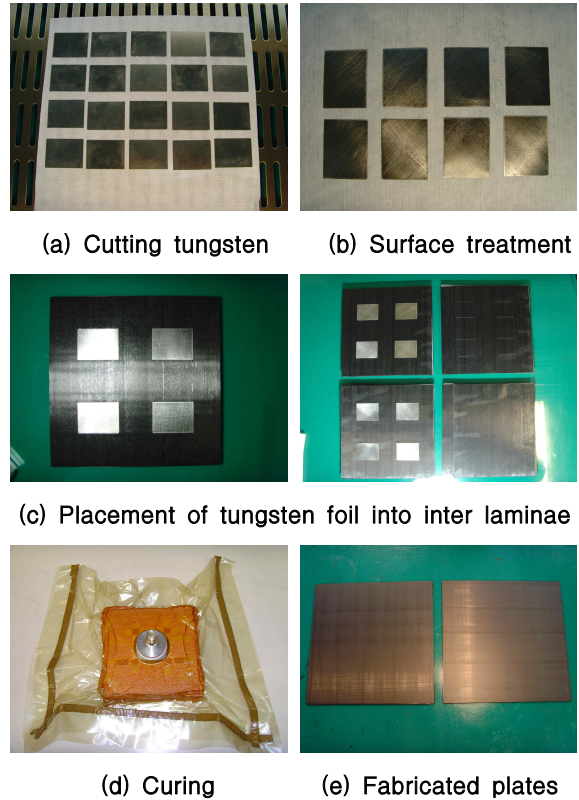


Fig. 11. Fabrication process of enhanced radiation spot shielding plate

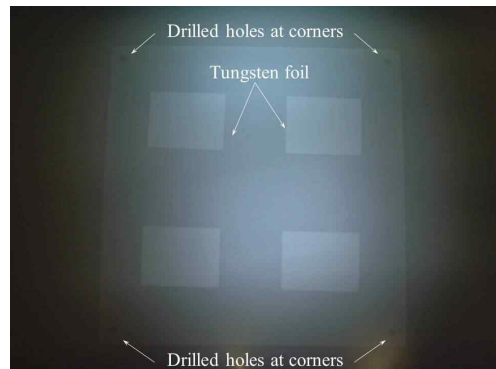


Fig. 12. Non-destructive inspection image

Figure 12에 제시한 바와 같이, 이리듐 동위원소를 이용한 비파괴검사를 통해, 텅스텐 박막이 설계된 치수에 일치하게 삽입되었음을 확인하였다.

추가로 텅스텐 개재물 주변의 기공(void)이나 텅스텐 모서리 부의 결합 가능성을 정밀하게 살피기 위하여 X선을 이용한 정밀 검사를 수행하였으며, 대표적인 결과를 Fig. 13에 제시하였다. 정밀 확대 검사에서도 어떠한 결함이나 기공의 함유는 발견되지 않았으며, 매우 양호한 국부 강화 방사차폐판이 제작되었음을 확인하였다.

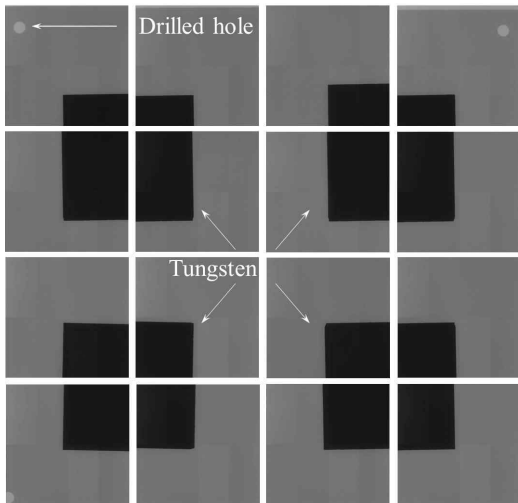


Fig. 13. X-ray inspection at corners of tungsten

완성된 방사차폐판은 평균 두께 3.5mm로서, 격자-강화된 복합재 패널의 면재1과 면재2의 실측 두께 1.14mm를 감안할 때, 총 두께 4.64mm로서 설계값 4.5mm보다 약간 큰 값이며, 이는 양성자 빔 27.5MeV에 대하여 약간의 차폐 여유를 가질 수 있음을 의미한다.

### 3.3 격자-강화된 다기능 구조체 통합

방사차폐판은 Hysol사의 EA9321 접착제를 적용하여 복합재 패널에 상온경화하였다. 다기능 구조체로 구현된 전자회로는, MOSFET을 이용한 RDB회로, 발열모사회로, 고집적화회로의 세 가지 종류로 구성되었다. 이중 RDB회로는 본 연구의 다기능 구조체 방사차폐 성능을 검증하기 위한 회로로서, 동일한 두 개의 회로를 적용하였다. 하나는 방사차폐판 위에 부착하고, 다른 하나는 방사차폐판이 없이 격자공간에 바로 부착함으로써, 외부에서 입사되는 양성자에 대하여 방사차폐판 유무에 따른 방사능 측정값을 비교하기 위함이다. 모든 전자회로를 격자공간에 배치하고 에폭시를 이용하여 부착한 후, 커넥터, 하니스 등 전기적 인터페이스를 완비하여, 전기전자, 방사차폐, 열전달 기능을 갖춘 다기능 구조체를 완성하고 이를 Fig. 14에 제시하였다. 그리고 다기능 구조체에 부착된 RDB 회로를 Fig. 15에 자세히 제시하였다. 외부에서 인가되는 동일한 총 방사선량(TID)에 대하여, 방사차폐판이 있는 RDB회로의 센서 S1과 방사차폐판이 없는 RDB회로의 센서 S4는 각각 노출된 방사선량에 따른 FET 문턱 전압값을 내보내게 되며, 이들을 비교함으로써 센서에 도달한 총방사선량의 크기를 상대적으로 비교할 수 있다.

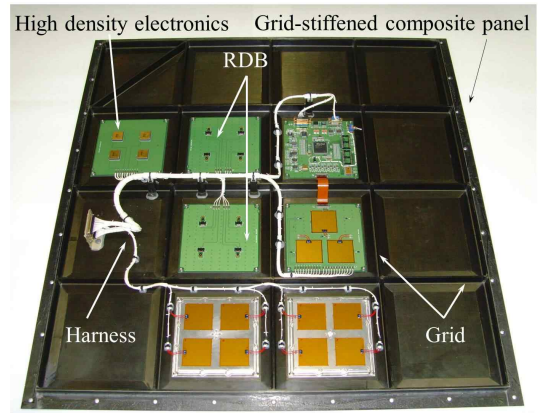
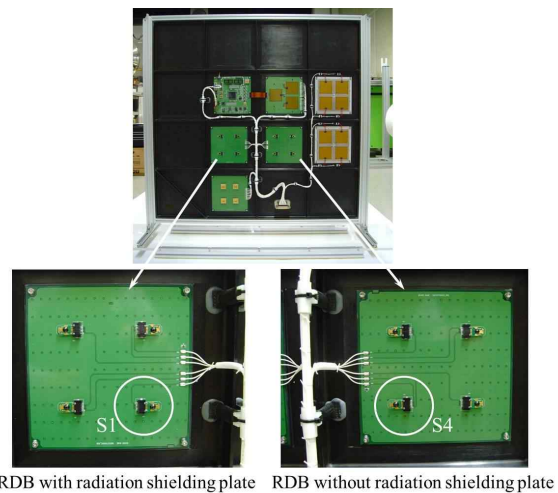


Fig. 14. Fabricated multi-functional structures



RDB with radiation shielding plate RDB without radiation shielding plate

Fig. 15. Radiation demonstration board in detail

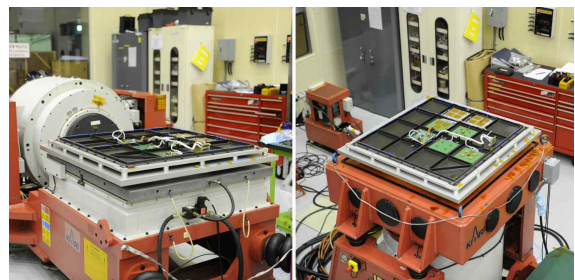


Fig. 16. Vibration test (lateral and vertical)

Table 3. Random vibration test condition

Frequency	PSD ( $g^2/Hz$ )
20 Hz	0.013
27.3 MeV	0.08
27.4 MeV	0.08
27.5 MeV	0.013
Overall Grms	10 Grms
Duration	1min/axis

통합된 격자-강화된 다기능 구조체의 구조 건전성을 확인하기 위하여, Fig. 16과 Table 3에 제시한 바와 같이 3축 방향으로 랜덤진동시험을 수행하였다. 진동시험 전후 다기능 구조체에는 어떠한 손상도 발견되지 않았으며, 진동시험 전후 전자회로의 기능시험을 통하여 모든 전자회로의 기능이 정상임을 확인할 수 있었다.

한편 하우징이 없는 전자회로의 장착으로 인하여 전자파 차폐가 요구된다. 최근 유연 경량의 전자파 차폐 직조물(EMI shielding fabric)이 상용에서 사용되고 있으며, 기존연구[15]에서 적용된 바 있는 전자파 차폐 직조물은 1GHz 주파수 범위에서 차폐 유효성은 최대감쇠 80dB의 우수한 값을 갖는다. 이러한 유연한 소재를 다기능 구조체 격자별로 둘러싸 부착하는 것이 가능하며, 경량 전자파 차폐를 위한 효과적 수단이 될 수 있다.

#### IV. 다기능 구조체 방사차폐 성능분석

##### 4.1 방사차폐 판에 대한 성능검증

일차적으로 양성자 조사(irradiation) 시험을 통하여, 국부 강화 방사차폐판에 대한 차폐 성능을 실험적으로 검증하고자 한다. 입자의 진행경로를 고려하여, 면재2, 면재1, 방사차폐판의 조합으로 구성된 양성자 조사(irradiation) 시편을 구성하였다. 물질에 입사된 양성자는, 물질과 상호작용으로 서서히 에너지를 잃어가며, 입자의 에너지와 물질의 종류에 따라, 정지할 때까지 달리는 거리가 다르다. 에너지 손실과정에서 생성되는 이온화량은 입자가 정지하기 직전에 갑자기 증가하는데, 본 연구에서는 이온 챔버(ion chamber)를 통하여 이온화량을 상대적으로 측정하였다. 양성자 빔 발생장치로 원자력의학원의 MC-50 사이클로트론(Cyclotron)을 활용하였으며, 양성자 조사시

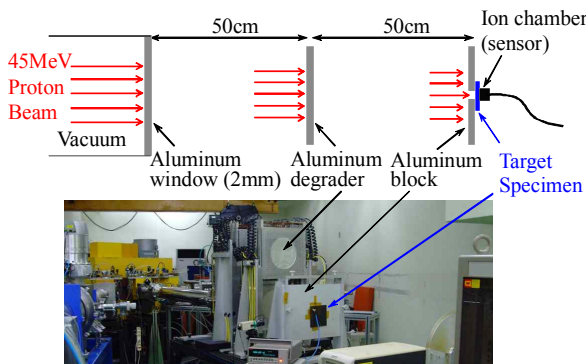


Fig. 17. Proton irradiation test setup

험의 전체적인 구성을 Fig. 17에 나타내었다.

MC-50 사이클로트론에서 발생되는 양성자빔의 에너지는 45MeV로 설정되어 있어, 실험에 필요한 에너지 수준으로 조절하는 작업이 필요하다. 45MeV의 양성자빔은, 두께 2mm의 알루미늄 윈도우, 50cm의 공기층, 알루미늄 degrader 및 50cm의 공기층을 통과하면서 순차적으로 빔의 에너지가 감소되어 시편에 입사된다. 알루미늄 degrader는 여러 두께의 알루미늄 차폐체 조합으로서, 그 두께를 조절함에 의해 최종적으로 시편 시편에 도달하는 양성자빔의 에너지를 조정하는 기능을 수행한다. 27.5MeV의 양성자빔이 시편에 입사되는 조건을 만들기 위하여, SRIM 코드를 이용하여 해석에 의해 알루미늄 degrader 두께에 따라 시편에 입사되는 양성자빔의 에너지를 분석하였다. Fig. 18은 degrader 두께에 따라 시편에 입사되는 평균 에너지와, 대표적인 투과 궤적 예로서 두께 2.7mm의 degrader 사용 시 45MeV 양성자 빔의 물질 내 투과궤적을 나타낸 것이다. 양성자 빔 전류(Beam current)는 5nA, 조사시간(Irradiation time)은 20sec으로 설정하였다.

Figure 19에 나타낸 바와 같이, 면재2, 면재1, CFRP/W/CFRP 방사차폐판을 차례로 조합한 시편을 설치하고, 시편 뒷면에 이온챔버를 설치하였다.

해석결과를 활용하여, 알루미늄 degrader 두께를 변화시켜 시편에 조사되는 양성자 빔 에너지

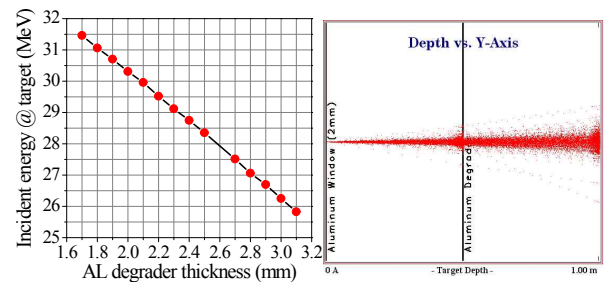


Fig. 18. Proton beam energy at target due to degrader thickness and its typical trajectory

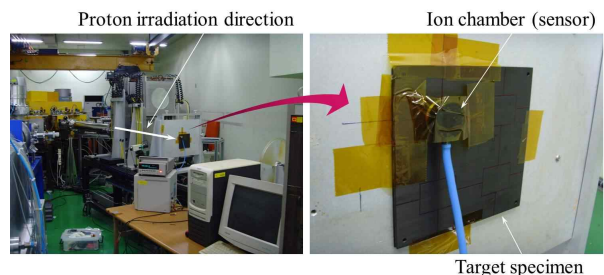


Fig. 19. Target specimen of proton irradiation



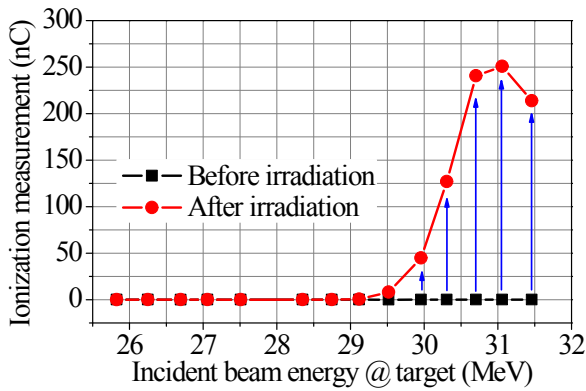


Fig. 20. Ionization measurement due to change of proton beam energy

Table 4. Ionization measurement in detail

Degraded thickness (mm)	Incident beam energy@target (MeV)	Ionization (nC)	
		Before irradiation	After irradiation
2.5	28.350	0.016	0.011
2.4	28.747	0.004	0.041
2.3	29.118	0.006	0.513
2.2	29.519	0.002	8.108
2.1	29.958	0.011	44.798
2.0	30.307	0.006	126.915

를 조절하고, 시편의 뒷면 이온챔버에서 측정된 이온화 에너지를 측정하여 Fig. 20에 제시하였다. 일반적으로 입사된 양성자빔이 매질 내에서 정지하기 직전에 이온화 에너지 값은 급격히 증가하고, 완전히 정지하면 이온화 에너지는 검출되지 않는다. 이온챔버 측정값은 미소한 변동의 폭을 갖는데, 편이상 측정값이 0.1nC 이하의 작은 값으로 관측될 때를 양성자 빔이 정지된 것으로 판단하였다.

Table 4는 Fig. 20의 측정결과에서 양성자 빔이 정지되기 직전의 결과들을 자세히 제시한 것이다. 관측된 결과에 의하면, 면재2, 면재1 및 CFRP/W/CFRP 방사차폐판 조합은 약 28.7MeV의 양성자빔을 차폐할 수 있음을 알 수 있다. 이는 두께 150mil의 알루미늄이 차폐할 수 있는 양성자 에너지 27.2MeV보다 높은 값으로, 본 연구의 다기능 구조체는 양성자에 대한 방사차폐 요구사항을 충분히 만족한다고 판단할 수 있다.

#### 4.2 다기능 구조체에 대한 TID 영향 검증

시편 단위가 아닌 완성된 다기능 구조체에 대한 방사차폐 검증을 위하여, 추가적 평가를 수행

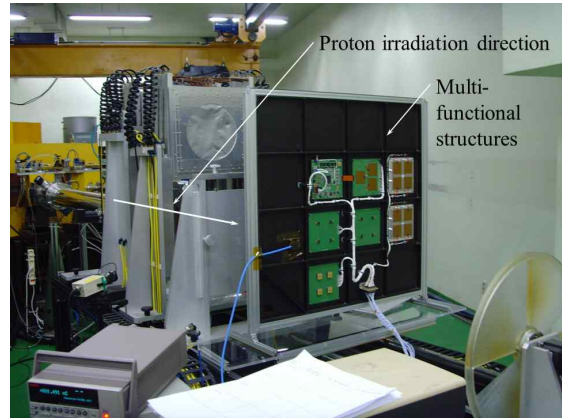


Fig. 21. TID experiment using proton beam

하였다. 다기능 구조체에 가하는 총누적방사선량(TID)을 30krad로 정하고, 국부 강화 방사차폐판이 있는 경우와 없는 경우에 대하여 RDB 회로의 FET 센서가 측정하는 문턱전압값을 비교하여 다기능 구조체의 차폐능력에 대한 검증을 수행하였다. MC-50 사이클로트론의 양성자 빔이, FET 센서 S1과 S4 (Fig. 15 참조)에 입사하도록 Fig. 21과 같은 시험장치 구성을 구성하였다. 센서 S1이 장착된 PCB에는 국부 강화 방사차폐판이 적용되었으며, 센서 S4가 장착된 PCB에는 방사차폐판이 적용되지 않았다. 사이클로트론의 알루미늄 degrader 조합에 의해, 다기능 구조체에 입사되는 양성자 빔의 에너지를 조절하여 37.4MeV와 30.0MeV의 두 종류로 생성하였다. 이들 각각의 입사 에너지에 대하여 다기능 구조체에 누적되는 총방사선량이 30krad에 도달하기 위해 요구되는 조사 시간을 각각 127sec, 146sec으로 구하고, 이 값을 이용하여 조사 시험을 수행하였다.

이때 방사차폐판이 적용되지 않은 S4센서에서 측정한 FET 문턱전압값과, 방사차폐판이 적용된 S1센서에서 측정한 FET 문턱전압값을 각각 측정하고, 이 결과를 Table 5에 제시하였다.

결과에 의하면 방사차폐판이 적용되지 않은 경우, 양성자 빔 노출 전후 문턱전압 변화( $\Delta V$ )가 약 1V, 0.7V로 크게 나타나며, 동일한 총방사선량이 누적되더라도 특히 양성자 빔 에너지가 더 높은 조사 조건(37.4MeV)에서 문턱전압값이 더 높게 측정되었다. 이는 방사차폐판이 없는 경우, 대부분의 빔이 물질을 투과하며, 양성자에 노출된 FET 소자가 투과된 빔이 지닌 에너지에 따라 반응한 결과이다.

반면에, 방사차폐판이 적용된 경우에는 양성자 빔 노출 전후의  $\Delta V$  변화가 매우 미미하였다. 특히 30.0MeV 양성자 빔에 의한 30krad 총방사선

Table 5. Test results from TID 30krad exposure

(a) with 37.4MeV proton irradiation for 127sec

MOSFET threshold V	@ S4	@ S1
At Ambient	4.350V	4.314V
After 30krad exposure	5.327V	4.319V
Voltage change, $\Delta V$	0.977V	0.005V

(b) with 30.0MeV proton irradiation for 146ec

MOSFET threshold V	@ S4	@ S1
At Ambient	5.322V	4.320V
After 30krad exposure	6.034V	4.319V
Voltage change, $\Delta V$	0.712V	-0.001V

량 조사에서는, 실제 누적방사선량의 값이 거의 관측되지 않음을 알 수 있으며, 이는 방사차폐판의 차폐능이 28.7MeV에 달하기 때문에 대부분의 양성자 빔이 방사차폐판 내에서 정지되고, 두께 2mm의 RDB 회로의 PCB 층을 통과하는 구간에서 잔여 빔들의 정지가 발생하기 때문인 것으로 판단된다. 즉, 방사차폐판이 상당한 양의 방사선의 차폐를 담당하기 때문에, 최종적으로 FET 센서에서 누적방사선량이 거의 관측되지 않는 것으로 고려된다. 37.4MeV 양성자 빔에 의한 30krad 총방사선량 노출에서도, 단지 약 5mV의 미소 문턱전압 변화만이 발견될 뿐이다.

이로써, CFRP/W/CFRP 조합의 두께 4.64mm 국부강화 방사차폐판은, 두께 150mil (=3.81mm) 알루미늄의 양성자 차폐능보다 높은 28.7MeV의 양성자 빔에 대한 충분한 차폐효과를 발휘함을 실험적으로 입증하였다. 이러한 결과를 통하여 본 연구에서 제작한 다물질 다층 조합의 국부 강화 방사차폐판은, 격자-강화된 다기능 복합재 구조체의 효과적 방사차폐 수단이 될 수 있음을 확인하였다.

#### 4.3 다기능 구조체의 질량절감 분석

제작된 CFRP/W/CFRP 방사차폐판의 비중을 계산하였으며, 비중이 큰 텅스텐을 적용하였음에도 불구하고, 그 값은 1.65 정도로 상당히 작은 값으로 얻어졌다. 이러한 원인으로서는 두께가 매우 얇은 텅스텐 박막(0.1mm)을 적용하였고, 국부 강화 차폐방식으로 차폐가 필요한 곳에만 텅스텐을 적용함으로써, 비중이 상대적으로 큰 텅스텐의 사용을 최대한 억제하였기 때문이다. 비중 2.7 두께 150mil(3.81mm)의 알루미늄이 갖는 27.2

MeV 양성자 차폐능과 증가하거나 우수한 성능을, 비중 1.65의 CFRP/W/CFRP 국부 강화 방사차폐판이 갖기 위해서는 약 4.5mm의 두께가 소요된다. 따라서 만일 동일한 면적에 대한 방사차폐가 이루어진다면, 본 연구의 국부 강화 방사차폐판을 적용할 때, 산술적으로 알루미늄 대비 약 28%의 질량절감이 가능한 것으로 분석된다.

앞서 제시한 전자회로의 집합적 배치 방식에 따라 특정 전자장비의 전자회로를 다기능 구조체에 통합한다고 할 때, 전자장비 하우징(Housing) 구조물이 제거됨으로 인하여, 상당한 질량절감이 향상될 수 있다. 일반적인 위성 전자장비 중량의 1/4~1/3 정도를 전자장비 하우징이 차지하고 있어, 다기능 구조체 기술 적용 시 20~30%의 질량절감을 충분히 달성할 것으로 판단된다. 한편, 하우징의 제거로 인한 방사차폐 대안으로서 본 연구에서 제시한 국부 강화 방사차폐판은, 알루미늄의 차폐능과 증가한 성능을 발휘하면서 경량으로 제작할 수 있어 다기능 구조체에 효과적 적용 수단이 될 수 있을 것으로 판단된다.

## V. 결 론

본 연구에서는 격자-강화된 복합재 구조패널을 다기능 구조체 기층으로 적용함으로써, 구조체로서 하중지지에 필요한 강도, 강성을 확보할 수 있을 뿐만 아니라, 전자회로를 삽입하고 내장할 수 있는 공간을 용이하게 확보하여 공간 활용도를 크게 향상시킬 수 있음을 제시하였다. 또한, 피치계열 탄소섬유의 적용을 통해 열전달특성을 향상시키고, 하우징 구조물이 없어도 내장된 전자회로가 우주방사환경에 충분한 내구성을 갖도록 방사차폐설계 방법을 제시하였다. 본 연구에서 설계 및 제작한 다물질 다층 물질조합에 의한 경량 방사차폐재에 국부 차폐(Spot shielding) 방식을 적용함으로써, 선택적 방사차폐를 증진하면서도 경량화를 동시에 달성하는 효과를 보였다. 국부차폐 강화 방사차폐판을 장착한 격자강화 패널 기반의 다기능 구조체는, 격자 공간을 활용한 전자회로의 집합적 내장과 전자장비 하우징의 제거를 가능하게 함으로써, 궁극적으로 위성의 부피절감과 질량절감을 극대화하는데 기여할 수 있을 것으로 예상된다.

## 후 기

본 연구는 한국항공우주연구원 주요사업의 지원으로 수행되었으며, 이에 대하여 감사드립니다.

## References

- 1) Barnett, D.M., Rawal, S.P., "Multi-functional structures technology demonstration on New Millennium Program (NMP) Deep Space 1 (DS1)," in *DS1 Technology Validation Report*, JPL, 1999.
- 2) Rawal, S.P., Barnett, D.M., Martin, D.E., "Thermal management for multifunctional structures," *IEEE Trans. Adv. Packaging*, Vol. 22, No. 3, 1999, pp. 379-383.
- 3) Guerrero, J., Fosness, E., Buckley, S., "Multifunctional structures," *Proceedings of AIAA Space 2001 Conference and Exposition*, held in Albuquerque, NM, 2001, AIAA-2001-4585.
- 4) Gottero, M., Poidomani, G., Tavera, S., Sacchi, E., Genbeltzu, G.A., "Development of light-weight multifunctional structures," *Proceedings of the 37th International Conference on Environmental Systems*, held in Chicago, IL, 2007, SAE Paper 2007-01-3130.
- 5) Aglietti, G.S., Schwingshackl, C.W., Roberts, S.C., "Multifunctional structure technologies for satellite applications," *The Shock and Vibration Digest*, Vol. 39, No. 5, 2007, 381-391.
- 6) Roberts, S.C. and Aglietti, G.S., "Satellite multi-functional power structure: feasibility and mass savings," *Proceedings of the IMechE, Vol. 222 Part G: J. Aerospace Engineering*, 2008, pp. 41~51.
- 7) Hahn, S.E., Usami, R., Ozaki, T., "Multi-functional structure spacecraft bus technology," *Proceedings of the 22nd AIAA International Communications Satellite Systems Conference & Exhibit*, held in Monterey, CA, 2004, AIAA-2004-3135.
- 8) Jang, T.S., Oh, D.S., Kim, J.K., Kang, K.I., Cha, W.H., Rhee, S.W., "Development of multi-functional composite structures with embedded electronics for space application," *Acta Astronautica*, Vol. 68, 2011, pp. 240~252.
- 9) Jang, T.S., Oh, D.S., Kim, J.K., Cha, W.H., Seo, J.K., Seo, H.S., Rhee, J., "Development of Multi-functional Structure Using Honeycomb Core Sandwich," *Proceedings of the 2010 KSAS Fall Conference*, 2010, pp. 874-877.
- 10) Seo, H.S., Jang, T.S., Rhee, J., Kim, W.S., Hyun, B.S., Lim, J.H., Hwang, D.S., Lee, S.K., Cho, H.K., Han, E.S., Kim, I.S., Sim, E.S., "Conceptual design of multi-functional structure using rectangular grid-stiffened structure for satellite," *Journal of the KSAS*, Vol. 39, No. 6, 2011, pp. 526~534.
- 11) Kim, T.Y., Hyun, B.S., Seo, Y.B., Jang, T.S., Seo, H.S., Lee, J.J., Kim, W.S., Rhee, J., "Study on the thermal radiation performance of the multi-functional structure made of the carbon fiber composite material," *Journal of the KSAS*, Vol. 40, No. 2, 2012, pp. 157~164.
- 12) Kim, T.D., Rotz, C.A., "Warping of flat composite isogrid panels," *IEEE Aerospace Conference Proceedings*, 1997, pp. 271~277.
- 13) Spieth, B.D., Qassim, K.S., Pittman, R.N., Russell, D.A., "Shielding electronics behind composite structures," *IEEE Transactions on Nuclear Science*, Vol. 45, No. 6, 1998, pp. 2752~2757.
- 14) Ziegler, J.F., Biersack, J.P., Littmark, U., *The Stopping and Range of Ions in Solids*, Pergamon Press, New York, 1985.
- 15) Jang, T.S., Seo, J.K., Rhee, J., "A Study on Fabrication of Monolithic Lightweight Composite Electronics Housing for Space Application," *Journal of the KSAS*, Vol. 41, No. 12, 2013, pp. 975~985.