

論文

MWNT가 첨가된 유리/에폭시 평직 복합재료로 이루어진 다층형 전자파 흡수 구조체의 제작 및 설계

이상의*, 강지호*, 김천곤**

Fabrication and Design of Multi-Layered Radar Absorbing Structures of MWNT-Filled Glass/Epoxy Plain-Weave Composites

Sang-Eui Lee*, Ji-Ho Kang* and Chun-Gon Kim**

ABSTRACT

The object of this study is to design radar absorbing structures(RAS) with load-bearing ability in X-band. Glass/Epoxy plain-weave composites of excellent specific stiffness and strength, containing multi-walled carbon nanotubes(MWNT) added to induce dielectric loss were fabricated. The observation of microstructure and the permittivity of the composites confirmed that the materials are suitable to be used for radar absorbing material. Genetic algorithm and theory for reflection/transmission of electromagnetic waves in a multi-layered RAS were applied to conduct an optimal design of a RAS composed of the developed composites. We observed that the thickness per ply changes with the number of ply and MWNT contents. The fabrication process was proposed considering the problem and applied to fabricate a designed RAS and the theoretical and measured reflection loss of the RAS were also found in good agreement.

초 록

본 연구의 목표는 X-band에서 하중지지가 가능한 전자파 흡수 구조(RAS)를 제작하는 것이다. 본 연구에서는 하중을 지지할 수 있도록 비강성·비강도가 우수한 유리섬유/에폭시 평직 복합재료에 손실을 일으킬 수 있는 MWNT를 첨가한 재료를 제작하였으며, 미세 구조의 관찰과 유전율 측정을 통해 흡수 재료로의 적합성을 확인하였다. 유전자 알고리즘과 다층형 RAS의 전자파 반사/투과 이론을 적용하여 그 복합재료로 이루어진 RAS에 대한 최적설계를 수행하였다. RAS의 제작을 통해 복합재료의 층당 두께가 층수와 MWNT의 함량에 따라 변함을 확인하였다. 이를 고려한 제작 공정을 제안하고 적용하여 설계된 RAS를 제작하였고, 그것의 반사손실의 예측치와 실험치가 잘 일치함을 확인하였다.

Key Words : X-band frequency(X-band 주파수), Permittivity(유전율), Radar absorbing structure(전자파 흡수 구조체), Multi-walled carbon nanotube(다중벽 탄소 나노튜브)

† 2005년 8월 10일 접수 ~ 2005년 9월 12일 심사완료

* 정회원, 한국과학기술원 항공우주공학전공 대학원

** 정회원, 한국과학기술원 항공우주공학전공

연락처, E-mail : cgkim@kaist.ac.kr

대전광역시 유성구 구성동 373-1

1. 서 론

현대전이 고성능의 전자 장비를 기반으로 한 전자전의 성격을 띄게 됨에 따라 무기체계에 있어서 적의 레이더 회피 능력인 스텔스 (stealth)

기술이 점점 더 강조되어가고 있는 실정이다. 스텔스 기술을 구현하는 방법은 크게 레이더파를 적방향 이외의 방향으로 반사시켜 버리도록 비행체 형상을 설계하는 방법과 전자파 흡수 구조(RAS, radar absorbing structure)나 전자파 흡수 재료(RAM, radar absorbing material)를 사용하는 방법으로 나누어진다[1]. 일반적으로 스텔스 성능을 향상시키기 위한 형상설계와 공기역학적으로 비행성능을 향상시키기 위한 형상설계와는 배치되는 경향이 있어, RAS와 RAM의 개발은 매우 중요하다.

RAM은 고무나 폴리머 등의 절연성 매질에 각종 유전손실이나 자성손실을 일으키는 재료를 첨가하여 코팅재로 만드는 것이 일반적이다. 이 경우 표면에 쉽게 적용할 수 있는 장점이 있으나 기계적 물성이 떨어져 구조적으로는 사용할 수 없으며 지속적인 유지와 보수가 필요한 단점이 있다. 반면 RAS는 섬유강화복합재료를 제작하는 공정에서 모재에 손실재료를 첨가하여 비강성 및 비강도가 우수할 뿐만 아니라, 유전손실도 가진다. 따라서 섬유강화복합재료의 우수한 기계적 물성으로 인해 RAM의 단점을 극복하면서도 요구하는 전자기적 특성을 가지도록 설계할 수 있다. 또한 프리프레그 형태로 성형되므로 다층화가 용이하다. 그러나 각 층이 유한하고 이산적인 두께를 가지고 있고 층수와 손실재료의 첨가량에 따라 층당두께가 달라져 설계된 RAS의 각 재료들의 두께를 정확하게 구현하기가 어렵다는 단점이 있다. 이런 제작상의 문제점을 고려한 연구가 있기는 하나, 경험에 의지하고 있다[1]. 본 연구에서는 이런 문제점을 고려할 수 있는 제작방법의 정립을 하나의 연구목적으로 한다.

손실재료로 세장비 (aspect ratio)가 크고, 작은 크기를 가지며, 높은 전기전도도를 가질수록 전자파 흡수 및 반사에 효율적이라고 알려져 있다 [2,3]. 본 연구에서는 이런 조건을 만족시킬 뿐만 아니라[4,5], 기계적 물성을 증가시킬 수 있는 보강재로서의 역할이 가능한 MWNT를 필러로서 선택하였다[5].

다층형 전자파 흡수 구조의 성능은 적층수, 각 층의 두께와 유전을 및 투자율, 주파수 대역, 입사각, 편파의 종류 등과 같은 많은 변수들에 의존한다. 이런 다차원의 문제를 풀기 위해서는 최적 설계 기법이 적용되어야 효과적인 설계가 이루어질 수 있다. 기존의 몇몇 연구에서는 Powell 방법이나 유전자 알고리즘 (GA, genetic algorithm)이 적용되었고 설계를 위한 목적함수가 제안되었다[6-9].

본 연구에서는 X-band (8.2-12.4 GHz)에서 수직 입사하는 전자파에 대한 다층형 RAS의 반사손실을 예측할 수 있는 프로그램을 구현하고 이를 유전자 알고리즘과 연계하여 다층형 전자파 흡수체를 설계하였다. 그리고 RAS를 제작하는데 있어 발생하는 층수와 손실재료의 첨가량의 따른 층당두께의 비선형적 거동을 고려할 수 있는 제작공정을 정립·제안하였고, 설계된 RAS에 이 공정을 적용함으로써 RAS를 효과적으로 제작할 수 있음을 확인하였다.

II. MWNT가 첨가된 유리/에폭시 직물 복합재료의 제작

2.1 재료 및 제작

본 연구에서 사용된 MWNT는 화학기상증착법 (CVD, chemical vapor deposition)에 의해 일진 나노텍에서 제조된 직경이 10-20 nm, 세장비는 1000 이상이며, 순도는 95% 이상인 것으로 투과전자현미경 (TEM, transmission electron microscopy)을 통하여 촬영한 모습을 Fig. 1에 나타내었다.

사용한 유리직물은 (주) 한국화이바에서 제작한 K618 유리섬유/에폭시 평직 프리프레그이다. MWNT를 에폭시 수지 내에 균일하게 분산시켜 직물에 도포하여 프리프레그를 제작하였다. 첨가한 MWNT의 함량은 Table 1에 나타내었다. 함량은 직물과 에폭시 및 MWNT의 총무게에 대한 MWNT의 무게의 비를 의미한다. 각각의 프리프레그는 동일방향으로 적층하여 3기압의 압력에서 80°C에서 30분, 130°C에서 2시간 동안 오토클레이브 (autoclave)에서 성형되었다. 그리고 시편 자체는 성형과정 동안 진공으로 유지하였다.

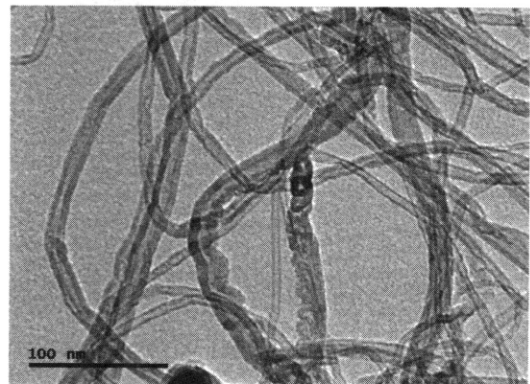


Fig. 1. TEM image of used MWNT

Table 1. Denotation of glass/epoxy lain-weave composites

Denotation	MWNT0.0	MWNT0.4	MWNT0.7	MWNT1.0
MWNT content (wt%)	0.0	0.4	0.7	1.0
Denotation	MWNT1.3	MWNT1.6	MWNT3.0	MWNT5.0
MWNT content (wt%)	1.3	1.6	3.0	5.0

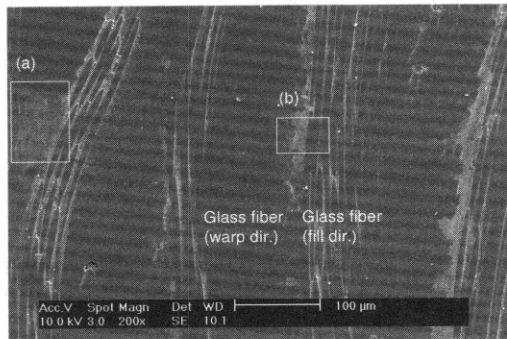
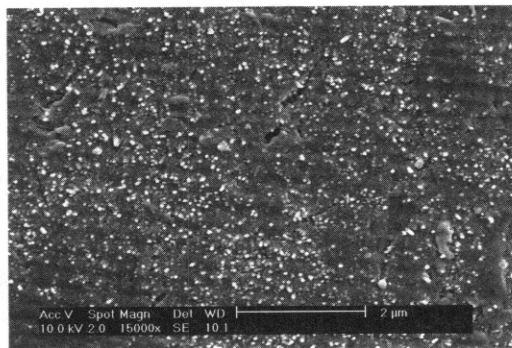
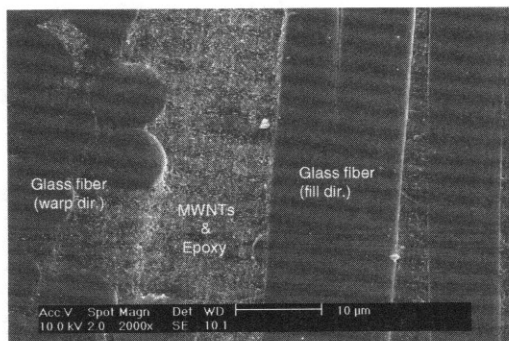


Fig. 2. SEM image of MWNT 1.0



(a) matrix rich region



(b) interface between yarns in warp and fill direction

Fig. 3. Zoomed SEM image of MWNT 1.0

2.2 미세구조

제작된 복합재료의 미세구조를 주사전자현미경 (SEM, scanning electron microscopy)을 이용하여 관찰하였다. Fig. 2는 MWNT 1.0의 SEM 사진이다. 원형의 수직 절단면은 warp 방향의 유리섬유이며, 세로방향으로 배열되어 있는 것이 fill 방향의 유리섬유이다. MWNT가 주로 모재 과잉 영역 (matrix rich region)이나 warp와 fill 방향의 유리 섬유 양(yarn)들의 계면에 분포하고 있음을 관찰하였다. 이런 재료 내의 불균일성이 전자파의 다중 반사를 일으켜 높은 유전율을 유도할 수 있을 것으로 기대된다.

Fig. 3은 Fig. 2에 나타내어진 각 부분을 확대한 그림이다. Fig. 3(a)와 Fig. 3(b)로부터 모재 과잉 영역이나 계면에 MWNT가 응집되어 있으나, 모재와 MWNT가 서로 잘 혼합되어 있음을 확인할 수 있었다.

III. MWNT가 첨가된 유리/에폭시 평직 복합재료의 유전율

3.1 유전율의 측정

X-band용 22.86 × 10.16 mm 크기의 도파관 (waveguide)에 시료를 넣고 HP 8722ES 회로분석기 (network analyzer)를 이용하여 산란계수 (S-parameter, scattering parameter) 중 S21을 측정하고 측정주파수 내에서의 위상의 변화를 이용하여 유전율을 계산하였다 [10]. 각 재료의 유전율을 측정하기 위해 사용된 시편의 두께는 Table 7과 같다. 본 연구에서 산란계수 중 S21만을 측정하여 유전율을 계산하는 방법을 이용하였으며, 이 방법은 시편 내에 90°의 위상차이가 나타나야 하므로, 저손실의 재료는 두꺼워야 한다. 그러나 너무 두꺼울 경우는 재료 내에서 손실이 많이 발생하게 되어 S21이 오차범위 내에 들어갈 수가 있으므로 재료의 두께가 적절해야 한다. 이런 점을 고려하여 Table 2와 같이 재료의 두께가 결정되었다.

그리고 산란계수의 측정 시 MWNT의 함량이 증가할수록 투과되는 전자파의 양이 줄어들게 되

Table 2. Thickness of specimen used for permittivity

Denotation	MWNT 0.0	MWNT 0.4	MWNT 0.7
Thickness (mm)	15.0	15.0	15.0
Denotation	MWNT 1.0	MWNT 1.3	MWNT 1.6
Thickness (mm)	15.0	5.0	3.0

3어 시료와 도파관 사이의 공극으로 투과되는 전자파의 양이 측정에 상당한 영향을 줄을 확인하였다. 본 연구에서는 이런 측정 오차를 줄이기 위해 은 페이스트(silver paste)를 이용하여 그 공극을 완전히 매워 주었다.

3.2 측정된 유전율

측정된 유전율을 Fig. 4에 나타내었다. 각 혼합량에 대해 5개의 시편이 측정에 사용되었다. 복합재료 각각의 유전율은 주파수에 따라서는 큰 변화가 없었다. 그리고 Fig. 5에 나타나듯 MWNT의 무게비가 증가함에 따라 유전율의 실수항과 허수항이 지수적으로 증가하는 경향을 보임을 확인하였다. 이런 현상은 기존의 연구에서도 발견되어지며[1,11], 이는 MWNT의 함량이 증가함에 따라 도전성 조직 (conductive network)의 형성 정도가 급격히 증가하고 기공도 발생하기 때문으로 사료된다.

이런 사실로부터 MWNT의 혼합량이 많은 MWNT 3.0과 MWNT 5.0은 복합재료 내에서 전자파를 효율적으로 흡수할 수 있을 것으로 보이

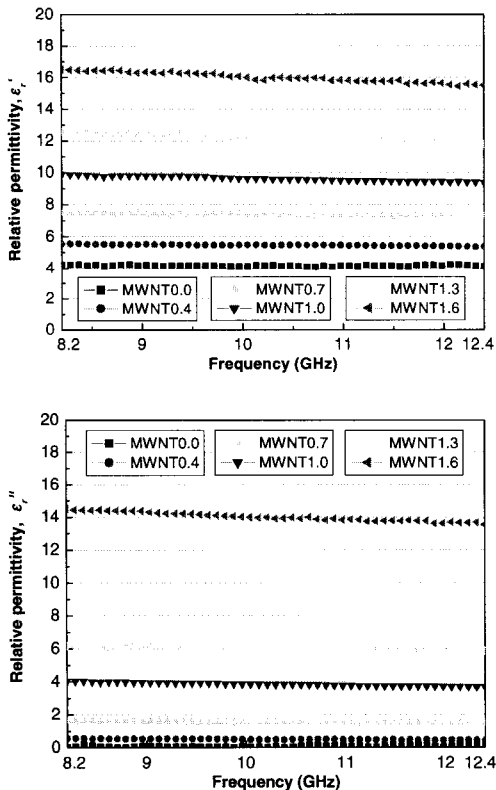


Fig. 4. Relative permittivity of MWNT-filled composites with frequency

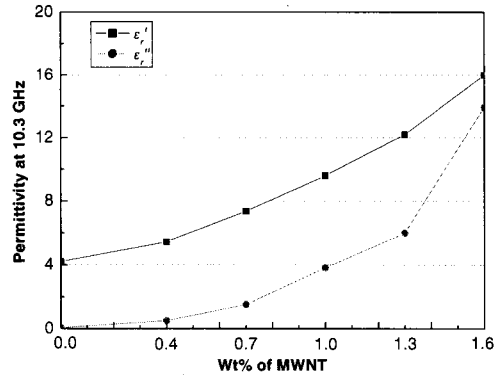


Fig. 5. Relative permittivity of MWNT-filled composites with weight fraction of MWNT at 10.3 GHz

나, MWNT의 혼합에 따른 점성의 증가로 인해 직물에 도포하는 작업성이 떨어졌고, 그 결과 물성의 재현성이 떨어져 전자파 흡수 재료로는 부적합하여 제외하였다.

IV. 다층형 RAS의 최적설계

4.1 다층형 RAS의 투과/반사 이론

특정 주파수에서 입사파를 모두 흡수하는 조건은 다층 구조 전체의 유효 입력 임피던스가 자유 공간의 임피던스와 일치될 때이다. 일반적으로 Fig. 6과 같은 다층형 전자파 흡수 구조에서 Region i 와 Region $i+1$ 사이에 존재하는 경계에서의 일반 반사계수 $\tilde{R}_{i,i+1}$ 는 식 (1)과 식 (2)와 같이 정의되어진다[1].

배면층이 금속이나 전도성이 우수한 탄소 복합재료로 되어 있는 경우에는 $\tilde{R} = -1$ 을 대입하여

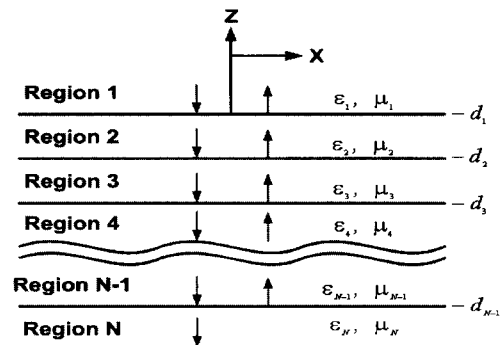


Fig. 6. Reflection and transmission in multi-layered RAS

순차적으로 전면에서의 반사계수를 구할 수 있다.

$$\tilde{R}_{i,i+1} = \frac{R_{i,i+1} + \tilde{R}_{i+1,i} 2e^{2ik_{i+1,z}(d_{i+1}-d_i)}}{1 + R_{i,i+1}\tilde{R}_{i+1,i} 2e^{2ik_{i+1,z}(d_{i+1}-d_i)}} \quad (1)$$

$$R_{i,i+1} = \frac{\mu_{i+1}k_{i,z} - \mu_i k_{i+1,z}}{\mu_{i+1}k_{i,z} + \mu_i k_{i+1,z}} \quad (2)$$

4.2 유전자 알고리즘

유전자 알고리즘은 자연 진화설과 유전학을 이용한 것으로, 이진 문자열로 표현된 설계점들이 생성되어 목적에의 적합성에 따라 다음 세대로 선택되어지고 교배와 돌연변이 과정을 거쳐 향상된 적합성(fitness)을 가지는 방향으로 설계점들을 진화시켜 나가는 것이 기본 원리이다.

유전자 알고리즘은 기존의 최적화 방법들보다 계산량이 많다는 단점이 있으나, 연속이나 미분 가능 등의 조건 등을 필요로 하지 않으므로 다양한 문제에 적용할 수 있고 확률론적 방법으로 여러 개의 설계점을 동시에 사용하게 되므로 국소 최적점에서 벗어나와 전체 최적점에 수렴할 가능성이 높다. 그리고 다목적 함수에 응용될 경우 단 한 번만 수행되어도 여러 개의 최적해를 얻을 수 있으며, 설계 변수의 표현이 이진 문자열이기 때문에 이산적인 설계 변수의 표현이 매우 용이하다는 장점이 있다. 본 연구에서는 이런 이유로 인해 최적 설계 알고리즘 중에서 유전자 알고리즘을 선택하였다[12].

4.3 유전자 알고리즘의 적용

유전자 알고리즘과 수직입사파에 대한 다층형 RAS의 반사손실을 계산하는 프로그램이 연계된 최적설계 수행 순서도를 Fig. 7에 나타냈다.

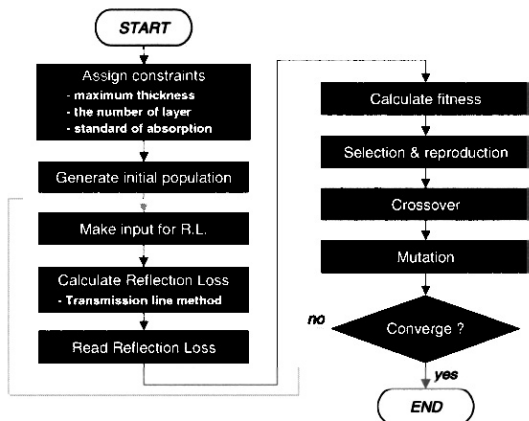


Fig. 7. Flow chart of genetic algorithm with reflection loss calculation program

Table 3. Parameter of genetic algorithm

Parameter	Value
Population size	200
Probability of crossover	0.7
Probability of mutation	0.05
Convergence limit	
# of successive same best designs	50
Error of the average value	0.01%
Selection parameter	
Tourney size	10

본 연구에서 최적 설계 문제를 풀기 위한 유전자 알고리즘의 기본 인수들을 Table 3과 같다. 이 인수들의 값은 많은 횟수의 최적화를 통해 정하였다.

총 적층수, 각 층의 두께, 각 층의 유전율 및 투자율 등이 설계변수로 선택될 수 있으나, 본 연구에서는 각 층의 두께와 그 층의 유전율을 설계변수로 선택하였다. 그리고 적층수는 설계공간이 너무 넓어지는 것을 막기 위해 설계를 하기 전에 입력값으로 지정되도록 하였다.

그리고 난수 발생 인수(random number seed)를 변화시켜 초기 설계점들의 분포를 바꿔가며 각 문제당 10번째 최적설계를 수행한 뒤 그 설계점들 중에서 제일 적합성이 우수한 해를 최적해로 선택하였다.

본 연구에서는 반사손실이 큰 전자파 흡수체를 설계하는 것이므로, 남기진 [6]의 목적함수를 식 (3) ~ 식 (4)와 같이 수정 · 제한하였다. 식 (3)에서 $|\Gamma_i|^2$ 은 특정 주파수에서 입사파의 전력과 반사파의 전력 사이의 비를 나타내며, NF는 주파수대역인 X-band를 분할한 개수를 나타낸다. 따라서 식 (3)은 주파수와 반사손실의 제곱의 그래프의 아래 면적을 의미한다. 식 (4)에서 -20 dB는 각각 입사전력의 99%를 흡수하는 것을 의미한다. 식 (4)를 추가하여 반사손실이 -20 dB 흡수대역의 면적을 최대화시키도록 하였다.

$$F = - \int_{f_{\min}}^{f_{\max}} |\Gamma_i|^2 df = - \sum_{i=1}^{NF} |\Gamma_i|^2 \left(\frac{f_{\max} - f_{\min}}{NF - 1} \right) \quad (3)$$

$$\text{If } |\Gamma_i|^2 < -20 \text{ dB}, |\Gamma_i|^2 = -20 \text{ dB} \quad (4)$$

4.4 최적 설계 결과

위의 유전자 알고리즘과 목적함수를 이용하여 2층형의 RAS에 대해 최대 두께를 3.5 mm로 제한조건을 주고 난수 발생 인수를 바꿔가며 최적설계를 10회 수행하였으며, 그 결과를 Table 4에 나타내었다. 2층형 RAS의 배면은 금속 박막이나 전도성이 우수한 탄소 섬유 강화 복합재료로 되어 있어, 흡수체

Table 4. Optimal result of 2-layered RAS

설계수	재료 1	재료 2	두께 1	두께 2	적합성
1	0.4 wt%	1.6 wt%	1.9 mm	1.4 mm	64.9
2	0.4 wt%	1.6 wt%	1.9 mm	1.4 mm	64.9
3	0.4 wt%	1.6 wt%	1.9 mm	1.4 mm	64.9
4	0.4 wt%	1.6 wt%	1.9 mm	1.4 mm	64.9
5	0.4 wt%	1.6 wt%	1.9 mm	1.4 mm	64.9
6	0.4 wt%	1.6 wt%	1.9 mm	1.4 mm	64.9
7	1.6 wt%	0.0 wt%	0.3 mm	2.5 mm	62.2
8	0.4 wt%	1.6 wt%	1.9 mm	1.4 mm	64.9
9	0.4 wt%	1.6 wt%	1.9 mm	1.4 mm	64.9
10	1.3 wt%	0.0 wt%	0.9 mm	1.5 mm	59.9

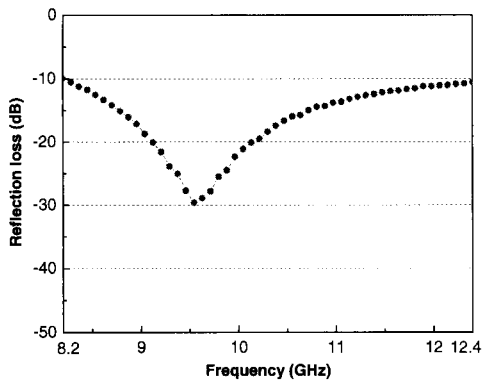


Fig. 8. Reflection loss of the optimal result ; MWNT0.4(1.9mm) + MWNT1.6(1.4mm)

를 통과하는 전자파는 없는 것으로 가정하였다.

Table 4에 보이는 바와 같이 10회 중 8회에서 1.9 mm의 MWNT 0.4와 1.4 mm의 MWNT 1.6로 이루어진 RAS의 적합성 (fitness)이 제일 우수한 것으로 나타났다. 이 구조의 X-band 대역에서의 반사손실을 Fig. 8에 나타내었다. 10 dB 흡수 대역은 4.2 GHz (8.2-12.4 GHz)로 X-band 전역에 걸쳐 흡수하였으며, 20dB 흡수 대역은 1.0 GHz (9.1-10.1 GHz) 였다.

V. 다층형 흡수구조의 제작과 반사손실 측정

5.1 자유공간 측정법

TEM 모드에서의 반사손실을 측정하기 위한 실험시스템의 구성도는 Fig. 9와 같다. 한 쌍의 X-band 용 spot-focusing horn lens 안테나가 크기가 1.83 × 1.83 m인 알루미늄 선반 위에 장착되어 있다.

평판형 재료 샘플을 고정하는 홀더 (holder)는 두 안테나 사이에 그 중심이 안테나 중심축 선상

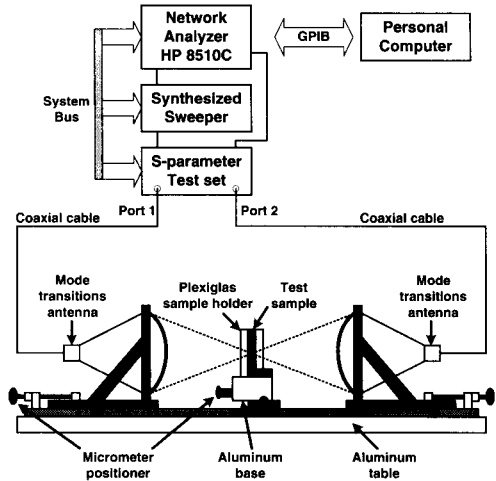


Fig. 9. Free space measurement system

에 놓이도록 설치해 놓았다. 시편은 150 × 150 mm의 크기로 제작되었다. 양단간의 안테나로부터의 신호는 동축선을 이용해서 회로분석기 (HP 8510C)의 S-매개변수 측정단에 연결되어 받아들여지고 다시 범용 인터페이스 버스 (GPIB, general purpose interface bus)에 연결되어 컴퓨터로 전달된다[13].

5.2 RAS의 제작 및 반사손실 측정

RAS를 제작하는 방법은 각각의 층을 제작한 후 이차 접합하는 방법과 일체성형하는 방법이 있다. 본 연구에서는 제작비용을 고려해 일체성형으로 RAS를 제작하였다.

본 연구에서는 각각의 유리/에폭시 평직 복합재료를 다양한 두께로 제작해본 결과, MWNT 함량이 동일한 경우에는 적층수가 증가함에 따라 층당 두께 (TPP, thickness per ply)가 감소하다가 점차적으로 특정값으로 수렴하는 경향을 보였으며, 적층수가 동일한 경우는 MWNT 함량이 증가함에 따라 층당 두께가 증가하는 경향을 보였다. 전자는 두께가 증가함에 따라 유리섬유에 압축(compaction)이 일어나기 때문이며, 후자는 MWNT가 이런 압축효과를 방해하기 때문이다. 이런 층당두께의 비선형성은 RAS를 구성하는 각 복합재료를 설계된 두께대로 제작하기 어렵게 만드는 요인이다. 적층수에 따른 이런 두께의 비선형성을 보이기 위해 Table 5에 성형 후의 두께를 표시하였다. 따라서 본 연구에서는 설계된 RAS를 구성하는 각 재료의 층당 두께는 각각의 복합재료가 RAS의 전체 적층수로 적층·성형되었을 때의 층당 두께와 동일하거나 유사할 것이라는 가정 하에 이런 문제를 고려한 제작공정을 제안하였다.

Fig. 10에서 보듯 두께 t_1 인 MWNT 0.4와 두께 t_2 인

MWNT 1.6으로 이루어져 총두께 t_{RAS} 인 RAS를 설계하였을 경우, 앞서 언급했던 층당두께의 비선형성으로 인해 각 재료의 층수를 결정하기가 어렵다(STEP 1). 이를 해결하기 위해 먼저 각 복합재료로 두께 t_{RAS} 로 RAS를 제작한 후 층당두께 TPP_3 와 TPP_4 를 계산하고(STEP 2), 이 값들로 설계된 두께 t_1 과 t_2 를 나누어서 각각의 적층수 n_1 과 n_2 를 계산하였다(STEP 3). 정확하게 정수로 나누어 떨어지지 않을 경우는 반올림한 값을 사용하였다.

4장에서 설계된 RAS를 이 공정을 적용하여 제작하였다. 먼저 설계된 총두께 3.3 mm로 MWNT 0.4와 MWNT 1.6을 제작하였다. Table 5에서 보는 바와 같이 MWNT 0.4는 22장으로 층당두께 0.149 mm로 제작되었으며, MWNT 1.6은 20장으로 층당두께 0.169 mm로 제작되었다. 설계된 RAS에서의 MWNT 0.4와 MWNT 1.6의 두께는 각각 1.9 mm와 1.4 mm이므로 구해진 층당두께로는 각각 13장과 9장으로 1.94 mm와 1.35 mm의 두께를 가지는 RAS가 제작될 것으로 기대하였다. 최적설계는 0.1 mm의 두께 단위로 행하여졌으나, 실제 복합재료의 층

Table 5. Ply thickness according to the number of ply and MWNT contents

Material	No. of ply	Thickness (mm)	Thickness/ply (mm)
MWNT0.4	13	2.17	0.167
	22	3.27	0.149
MWNT1.6	9	1.47	0.164
	20	3.38	0.169
MWNT0.0	10	1.62	0.162
	16	2.45	0.153
MWNT1.3	6	1.11	0.185
	15	2.39	0.159

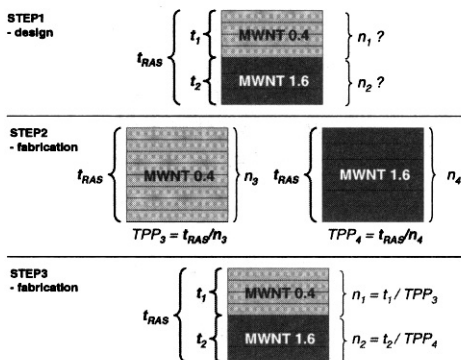


Fig. 10. Schematic of fabrication process considering nonlinearity of thickness per ply

Table 6. Comparison of EM characteristics between simulation and experiment ; MWNT 0.4 + MWNT 1.6

	Thickness (mm)	f_r (GHz)	10dB BW (GHz)	20dB BW (GHz)
Simul.	3.30	9.5	4.2 (8.2-12.4)	1.0 (9.1-10.1)
Exp.	3.27	9.8	4.1 (8.3-12.4)	1.2 (9.2-10.4)

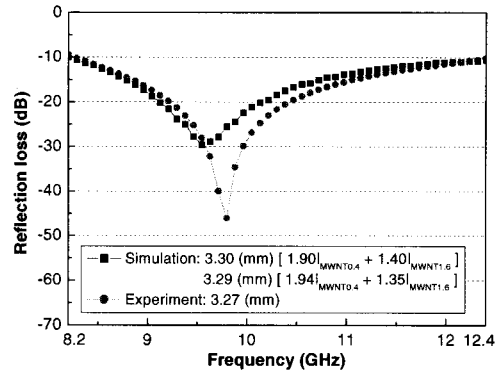


Fig. 11. Comparison of reflection loss between simulation and experiment ; MWNT 0.4 + MWNT 1.6

당두께는 연속적인 값이 아닌 이산적인 값이므로, 가능한 한 동일한 두께를 가지도록 각 재료의 층수를 정하였다. 실제 제작된 시편은 3.27 mm의 두께로 제작되어 본 연구에서 제안하는 공정이 잘 맞음을 확인하였다. Table 4에서 보듯 MWNT 0.4와 MWNT 1.6을 각각 13장과 9장으로 성형하여 이차 접합을 하였을 경우는 3.64 mm (= 2.17 + 1.47 mm)로 제작되어, 이차 접합시에는 더 적은 층수를 사용하여 합을 알 수 있었다.

제작되어진 RAS에 대한 반사손실의 계산치와 실험치를 Fig. 11과 Table 6에 나타내었다. 최적화로 제안된 RAS 구조의 흡수 성능 계산치와 제작 후 각 층의 예상 두께를 이용한 흡수성능 계산치가 동일하였다. 30 dB 이상의 흡수대역은 입사파의 전력을 99.9% 흡수하는 것을 의미하므로 30 dB 이상은 큰 의미가 없다고 볼 때, 최대 흡수 성능을 보이는 공진 주파수(resonance frequency, f_r)가 0.3 GHz 정도 고 주파수로 이동한 것을 제외하고는 계산결과와 실험 결과가 잘 일치하였다.

5.3 예측치와 측정치의 차이

계산치와 실험치가 차이를 보이는 주된 이유는 두 층의 경계면에서의 MWNT의 이동 그리고 각 재료의 유전율의 측정 시의 시편두께와 RAS로 제작되

있을 때의 두께의 차이에 따른 유전율의 차이 등을 들 수 있다.

MWNT의 함량이 다른 층의 계면에서의 모재와 MWNT의 이동이 발생하는 것을 확인하기 위해 MWNT 0.0이 포함되어 있는 Table 4의 10번째 RAS를 정립된 제작 공정을 적용하여 제작하였다. 이 RAS는 두께 제한을 2.6 mm로 두고 최적설계를 했을 때 구해지는 최적해이기도 하며, 오정훈[1]이 제

안한 구조와 흡수 성능은 비슷하나, 0.2 mm 더 얇은 것이다. 최적구조의 경우 각 층에 MWNT가 혼합되어 있어 이를 관찰하는 데 어려움이 따랐다. Table 5를 이용하여 6장으로 0.96 mm가 되는 MWNT 1.3과 10장으로 1.53 mm가 되는 MWNT 0.0으로 총 두께 2.49 mm로 제작될 것으로 기대하였으며, 실제 제작된 시편의 두께는 2.55 mm이었다. 제작된 시편의 재료 경계면을 Fig. 12에 나타내었다. Fig. 12 (a)에서 알 수 있듯이 계면에서의 두 층의 모재 성분이 혼합되어 계면이 sine 함수처럼 되어 있는 것을 명확히 관찰할 수 있었다. 하지만 Fig. 12 (b)처럼 두 층의 경계면이 뚜렷이 나타나기도 하였다. Fig. 12 (a)와 Fig. 12 (b)의 형상이 절단면에서 관찰되는 정도는 비슷하였다.

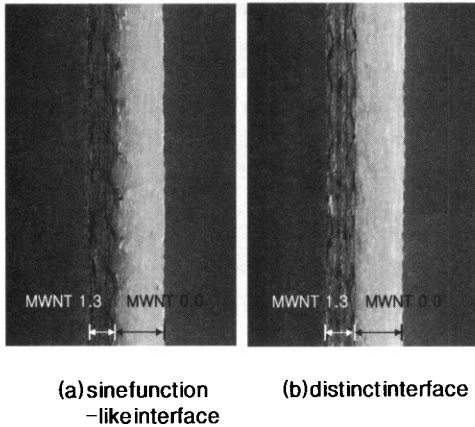


Fig. 12. Cutting planes of MWNT1.3 + MWNT0.0

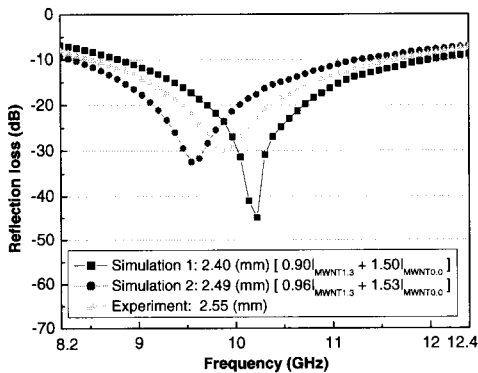


Fig. 13. Comparison of reflection loss between simulation and experiment ; MWNT1.3 + MWNT0.0

Table 7. Comparison of EM characteristics between simulation and experiment ; MWNT1.3 + MWNT0.0

	Thickness (mm)	f_r (GHz)	10dB BW (GHz)	20dB BW (GHz)
Simul. 1	2.40	10.2	3.1 (8.9-12.0)	0.9 (9.7-10.6)
Simul. 2	2.49	9.6	2.8 (8.4-11.2)	0.8 (9.2-10.0)
Exp.	2.55	9.9	3.1 (8.5-11.6)	0.9 (9.5-10.4)

이 RAS의 반사손실과 전자기적 특성을 Fig. 13과 Table 7에 나타내었다. 최적설계로부터 제안된 두께를 이용한 반사손실 계산치 (Simulation 1)와 층당두께의 비선형성을 고려한 제작 후의 각 층의 예상 두께를 이용한 계산치 (Simulation 2)를 실험치와 함께 나타내었다. 제안한 제작공정의 적용성을 파악하기 위해 계산치 2와 실험치를 비교했을 때 공진주파수가 0.3 GHz 고주파수로 이동하였으며, 흡수대역은 조금 더 증가하였으나 마찬가지로 이론치와 실험치가 잘 일치하였다.

또 다른 원인으로는 Table 2에 나타낸 유전율의 측정에 사용된 시편의 층당두께와 RAS로 제작된 시편에서의 층당두께의 차이에 따른 유전율의 차이이다. 적층수에 대한 층당두께의 차이는 동일한 두께를 비교했을 때 구성성분인 유리섬유, 에폭시, 그리고 MWNT의 조성비가 차이가 날 수 있음을 의미하므로, 예측치와 실험치의 차이를 유발할 수 있다.

앞서 살펴본 원인들이 있더라도 RAS의 흡수 성능은 약간의 주파수 이동만을 보이므로, 일체 성형을 통해 RAS를 제작하더라도 흡수성능이 크게 변하지 않음을 확인할 수 있었다.

V. 결 론

본 연구에서는 필러로서 적합한 전기전도도와 형상을 가지고 있는 다중벽 탄소나노튜브를 유리/에폭시 평직 복합재료에 혼합하여 전자파 흡수 재료를 제작하였다. 다중벽 탄소나노튜브는 주로 모재과잉 영역이나 경사와 위사의 계면에 분포되어 있음을 관찰하였으며, MWNT를 사용할 경우 기존의 카본블랙에 비해 훨씬 적은 양을 사용하더라도 높은 유전율을 얻을 수 있음을 확인하였다.

유전자 알고리즘과 반사손실 예측 프로그램을 연

계하여 제작된 복합재료로 이루어진 RAS에 대한 최적설계를 수행하였으며, 기존의 목적함수를 수정·적용하였다. 그리고 이를 통해서 X-band 전 대역의 전자파를 90% 이상 흡수하는 RAS를 설계할 수 있었다.

필러를 첨가한 섬유강화 복합재료에 나타나는 층당두께의 비선형성을 고려하여 RAS를 제작하였으며, 계산치와 실험치의 비교를 통해 일체 성형 공정에 잘 적용됨을 확인하였다. 층당두께의 비선형성을 고려하기 위해 5.2절에서 언급된 가정은 본 연구에서 사용된 성형조건이 아닌 경우에 대해서도 적용성이 높을 것으로 판단된다. 또한 층당두께의 비선형성에 대한 관찰을 통해, RAS를 제작함에 있어 층당두께의 거동에 대한 선행 연구가 필요함을 확인할 수 있었다.

향후에는 이렇게 제작된 RAS를 주파수 선택 표면(FSS, frequency selective surface)와 함께 적용하여 흡수대역을 광대역화하는 연구를 수행할 예정이다.

참고문헌

- 1) 오정훈, 복합재 적층판을 이용한 저자기파 흡수 구조체의 설계, 박사학위논문, 한국과학기술원, 2003.
- 2) D.D.L. Chung, "Electromagnetic Interference Shielding Effectiveness of Carbon Materials", Carbon, 2001, Vol. 39, pp. 279~285.
- 3) Shui X, et al., "Submicron Diameter Nickel Filaments and Their Polymer-Matrix Composites", Journal of Materials Science, 2000, Vol. 35, pp. 1773~1785.
- 4) A.Thess, R. Lee, et al., "Crystalline Ropes of Metallic Carbon Nanotubes", Science, 1996, Vol. 273, No. 5274, pp. 483~487.
- 5) A. Allaoui, S. Bai, H. M. Cheng, J. B. Bai, "Mechanical and Electrical Properties of a MWNT/Epoxy Composite", Composites Science and Technology, Vol. 62, 2002, pp. 1995~1998.
- 6) 남기진, 이상철, "다층유전체를 이용한 광대역 전자파흡수체 최적 설계", Journal - Korean Institute of Telematics and Electronics, Series A, Vol. 32, No. 1, 1995, pp. 70~78.
- 7) J.G. Guan, Z.P. Gan, G.H. Gao, and Q.J. Zhang, "Optimized Design of Multi-Ingredient Radar Absorbing Materials Using Genetic Algorithms", Key Engineering Materials, Vol. 249, 2003, pp. 367~372.
- 8) Jose Perini, Lawrence S. Cohen, "Design of Broad-Band Radar-Absorbing Materials for Large Angles of Incidence", IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility, Vol. 35, No. 2, May, 1993, pp. 223~230.
- 9) 김진봉, 김태욱, 김천곤, "광대역 전자파 흡수 복합재료 적층판 최적 설계 기술", 2004년 군사과학기술학회 논문집, Vol. II, 한국과학기술원, 2004. 8. 26, pp. 489~492.
- 10) 이호선, 두 개의 평판이 붙어있는 유전체 코팅 원통의 RCS 측정, 석사학위논문, 한국과학기술원, 2002.
- 11) M.E. Achour, M. El Malhi, J.L. Miane, F. Carmona, and F. Lahjomri, "Microwave Properties of Carbon Black-Epoxy Resin Composites and Their Simulation by Means of Mixture Laws", Journal of Applied Polymer Science, Vol. 73, 1999, pp. 969~973.
- 12) 강지호, 김정석, 공철원, 김천곤, 홍창선, "유전자 알고리즘을 이용한 압축 하중을 받는 보강된 복합적층판의 최적설계", 항공우주학회지, 제 28권, 제 3호, 2000, pp. 72~81.
- 13) Il Sung Seo, Woo Seok Chin, Dai Gil Lee, "Characterization of Electromagnetic Properties of Polymeric Composite Materials with Free Space Method", Composite Structures, Vol. 66, 2004, pp. 533~542.