

## 손실이 있는 유전체를 이용한 전파흡수체 설계

레이더로부터 임의의 영역대의 주파수를 가지는 전파가 손실이 있는 다층형 평면 유전체에 수직 입사할 경우 유전율(Permittivity), 유전체의 두께, 손실탄젠트를 이용하여 최소화된 반사계수를 가지는 유전체를 설계 할 수 있다. 이러한 최소화된 반사계수를 가지는 유전체는 넓은 주파수 영역에 대한 흡수성과 최소화된 유전체의 두께를 고려해야 한다. 전송선로이론으로 임피던스와 반사계수를 유도하고 알고리즘을 이용해 최적화 된 전파흡수체를 설계 할 수 있다.

### 1. 서 론

전자파 흡수에 관련된 기술은 상업기술로서는 유해한 전자파를 차폐 및 흡수하여 고성능의 전자기기를 보호하는 기술로서 주로 MHz의 주파수 영역에서 활용될 수 있으며, 군사기술로서는 스텔스 기술 및 레이더 안테나 제작기술의 일환으로 주로 GHz의 주파수 영역에서 활용 될 수 있다.

최근에 있어서는 위성방송, 휴대폰 등의 상업용 주파수영역이 극초단파(UHF:300MHz~3GHz)까지 확대되어 주 GHz의 주파수에서의 군사기술과 상업기술의 영역사이의 경계가 점점 벌어지고 있다. 극초단파이상의 라디오파(SHF:3GHz~30GHz)에서의 주파수는 주로 레이더에서 많이 사용되고 있는데, 이 영역에서의 전자파 흡수기술은 주로 군사기술에 국한된다.

현대전에서 상대방의 레이더에 감지되지 않는 스텔스 기능은 전쟁의 승패를 좌우할 수 있는 중요한 전략적 요소이다. 최근의 걸프전에서 이미 잘 입증된바와 같이 현대전에서의 승패는 제공권의 선점에 크게 의존하고 있다. 전투 시에 상대의 후방까지 깊숙하게 침투하여 목표물을 공격하고 아군의 손실을 최소로 줄일 수 있는 뛰어난 기능의 항공기는 전쟁의 승패를 좌우하는 매우 중요한 요소이다. 걸프전에서 활약상이 돋보인 F-117A 스텔스전폭기의 경우 천여 번이 넘는 출격에서 단 한 대의 손실도 없이 이라크의 중무장된 목표물을 성공적으로 파괴함으로써 항공기의 생존성을 제고할 수 있는 중요한 기술로서의 스텔스 기능에 대한 관심이 새롭게 부각되었다.

스텔스 항공기는 매우 다양한 요소에 대하여 설계를 하여야 하는데 먼저 육안으로 보아서 보이지 않도록 해야 하는데 이를 위하여 표면에 특수한 도색을 하기도 하며 엔진의 완전연소를 유도하여 배기가스에 의한 식별을 방지한다. 또 소음을 방지하기 위하여 기체와 엔진 및 엔진의 장착위치를 재설계하기도 한다.

기체구조물과 엔진에 의해 발생하는 적외선(Infrared) 탐지 가능성을 최소화하여야 한다. 최근에 개발된 탄소-탄소 복합재료(Carbon-Carbon Composite)는 초고온환경에서도 뛰어난 구조적 특성을 가지므로 엔진의 노즐부위에 적용되어 효과적인 적외선 차단제로 사용된다. 또한 B-2 전폭기와 같이 엔진을 동체에 삽입시킴으로 외부에 노출되는 열량을 줄이기도 한다. 또한 레이더 탐지면적(RCS :

Radar Absorbing Structure)나 전자파흡수재료(RAM : Radar Absorbing Material)를 사용할 수 있다.

특히 고분자 기지 섬유강화 복합재료는 전자파나 적외선(Infrared)등을 차단하는 기능성 재료의 역할은 물론 동시에 하중을 지탱하는 구조적인 역할을 동시에 수행할 수 있어, 고성능의 항공기를 설계함에 있어서 더 자유롭고 고기능성의 설계를 가능하게 한다.

특히 B-2의 경우 정확한 재료의 종류는 알려지지 않지만 수천 파운드의 탄소섬유강화 복합재료가 사용되었다.[1]

본 원고에서는 유전체를 사용하여 전자파 흡수 재료의 설계 및 제작기술의 개발에 필요한 기초적인 지식을 제공하고자 한다.

## 2. 본 론

### 2.1 반사계수를 계산하기 위한 수학적 모델

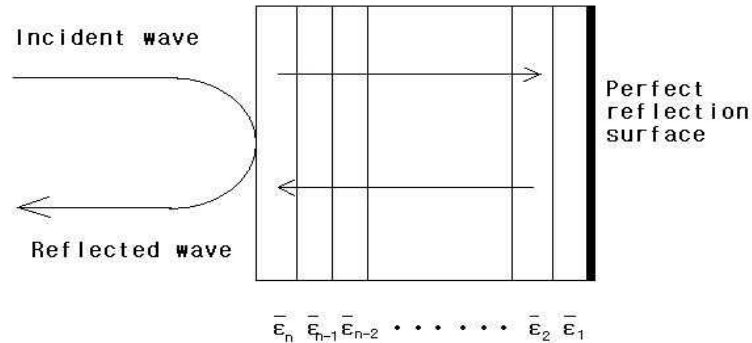


그림 1. 전자 흡수체의 기본 구성

그림1과 같이 각각 다른 두께와 유전율을 가지는 여러 층으로 구성된 전자파 흡수 재료를 설계하기 위해서 사용되는 해석적인 계산법은 전송선로이론으로 아래와 같이 간략하게 표현될 수 있다.

$$Z_n = \bar{Z}_{0n} \cdot \frac{\bar{Z}_{n-1} + \bar{Z}_{0n} \cdot \tanh(\bar{\gamma}_n \cdot d_n)}{\bar{Z}_{0n} + \bar{Z}_{n-1} \cdot \tanh(\bar{\gamma}_n \cdot d_n)} \quad (1)$$

$\bar{Z}_n$ -유전체로의 입력임피던스,  $d$ -유전체의 두께,  $\bar{\gamma}_n = \alpha_n + j\beta_n$ -전파상수 위의 전파상수는 공기 중의 전파되는 전파의 진폭과 위상을 결정할 수 있다. 만일  $\alpha=0$  전송선로이론에 의해 손실이 없는 무손실 전송선로의 경우에 해당된다.

여기서

$$\alpha_n = \frac{2\pi}{\lambda\sqrt{2}} \cdot \sqrt{\sqrt{\epsilon_n'^2 + \epsilon_n''^2} - \epsilon_n'} - \text{감쇠 계수} \quad (2)$$

$$\beta_n = \frac{2\pi}{\lambda\sqrt{2}} \cdot \sqrt{\sqrt{\epsilon_n'^2 + \epsilon_n''^2} + \epsilon_n'} - \text{위상 계수} \quad (3)$$

$$\overline{Z_{0n}} = \frac{\sqrt{\mu_a}}{\sqrt{\epsilon_a}} = \frac{\sqrt{\mu_0}}{\sqrt{\epsilon_0}} \cdot \frac{\sqrt{\overline{\mu}}}{\sqrt{\overline{\epsilon}}} = \frac{120\pi}{\sqrt{\overline{\epsilon}}} = \frac{Z_0}{\sqrt{\overline{\epsilon}}} \quad \text{-유전체 내의 임피던스} \quad (4)$$

$\epsilon'$ 은 유전율의 실수,  $\epsilon''$ 은 유전율의 허수를 나타낸다. 공기 중의 임피던스는  $Z_0 = 377\Omega$ ,  $\overline{\mu} = 1$ 로 나타내진다. 반사계수는 입력임피던스와 특성임피던스 방정식의 상관관계성으로 인해 쉽게 다음과 같이 결정될 수 있다. [2]

$$|\Gamma| = \left| \frac{\overline{Z_{n2}}(d_1 + \dots + d_n) - Z_0}{\overline{Z_{n2}}(d_1 + \dots + d_n) + Z_0} \right| \quad (5)$$

## 2.2 단층형 전파흡수체 설계 및 해석

단층형 전파흡수체는 한 층으로 되어 있고 일반적으로 주파수 대역폭이 좁은 협대역형 전파흡수체 특성을 나타낸다.

만일 유전율( $\epsilon = \epsilon' - j\epsilon''$ )의 허수부는 손실 항을 나타내며 만약 유전체의  $\epsilon'' = 0$ 이면 무손실 재료가 되므로 유전체로 입사한 파는 모두 반사가 된다. 그렇기 때문에  $\epsilon''$ 가 0이 되지 않는 경우에 전파흡수가 일어나게 된다.

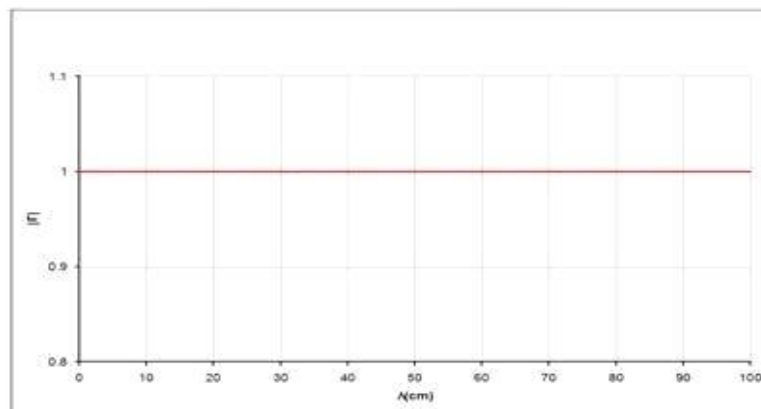


그림 2. 손실 항이 0일 때의 반사계수

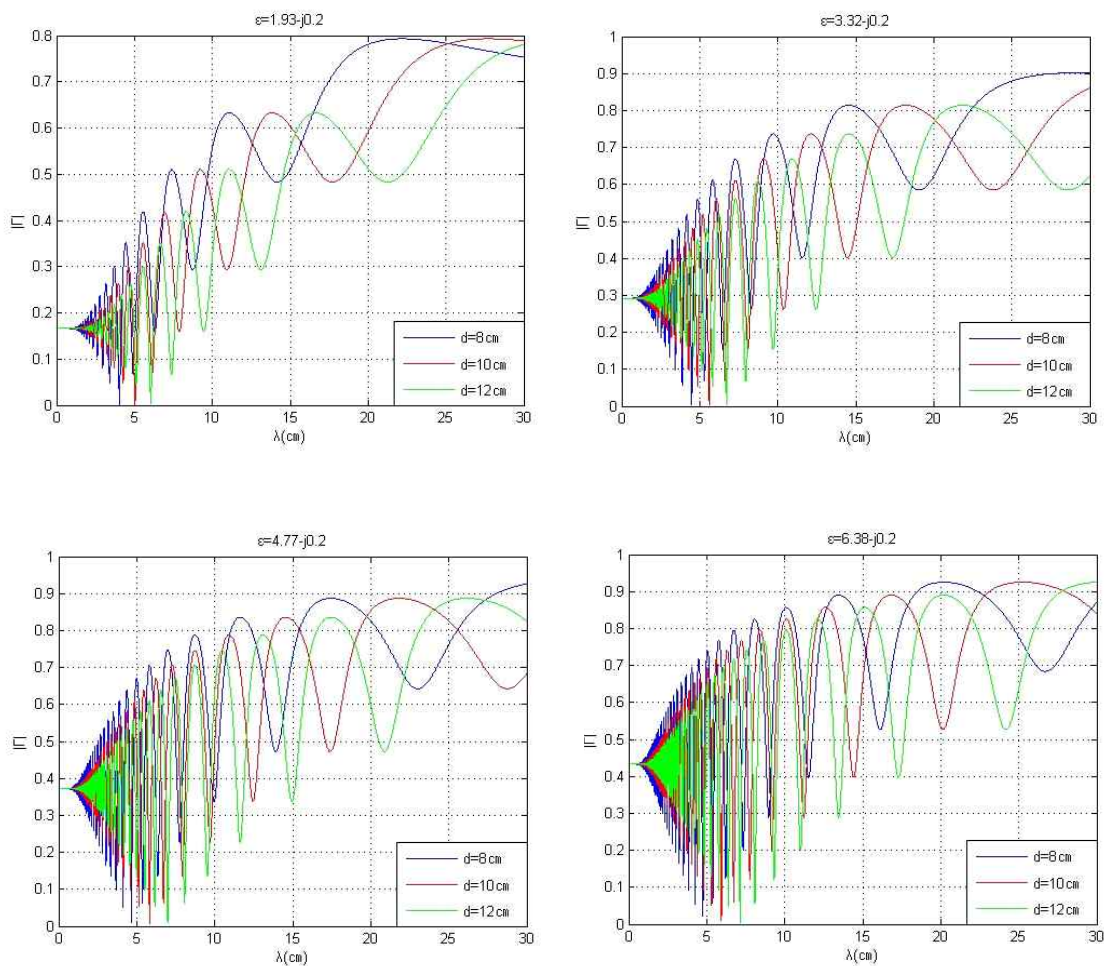
그래프1은  $\epsilon'' = 0$ 일 경우 반사계수( $|\Gamma|$ )의 값이 일정하게 1의 값으로 나타나는 것을 알 수가 있다. 즉 모든 입사파는 완전반사가 일어난다는 것을 알 수가 있다.

유전율의 허수부( $\epsilon'' = 0.2$ )와 유전체 두께( $d = 10\text{cm}$ )를 고정을 한 후 최소의 반사계수 값을 가지는 경우의 주파수와 유전율의 실수부를 수치해석을 통해 찾아 표1에 나타내었다. 또한 주파수 대역폭이 굉장히 협소한 협대역형 전파 흡수체의 특성을 보여주고 있다.

$\epsilon$	d(cm)	$\lambda$ (cm)	dB	$\Delta f$ (GHz)	f(ave)GHz	$\Delta f/f(\text{ave})$ GHz
1.93-j0.2	10	5.0364	-77.0856	5.8564~6.0612	5.9566	0.0344
3.32-j0.2	10	5.6025	-83.7076	5.3137~5.3965	5.3548	0.0155
4.77-j0.2	10	5.8224	-75.0309	5.1272~5.1782	5.1525	0.0099
6.38-j0.2	10	5.9422	-86.6624	5.0308~5.0665	5.0486	0.0071
8.17-j0.2	10	6.0170	-74.9239	4.9725~4.9993	4.9859	0.0054

표1. 단층형 전파흡수체의 파라미터 및 -20GHz이하 주파수 대역폭

표1의 각각의 경우에는 두께를 일정한 값으로 유지해서 찾은 결과이기에 유전체의 두께를 변화시켜가면서 전파가 흡수되는 주파수대역의 변화를 알아보았고 그 결과를 아래의 그림3 나타내었다.



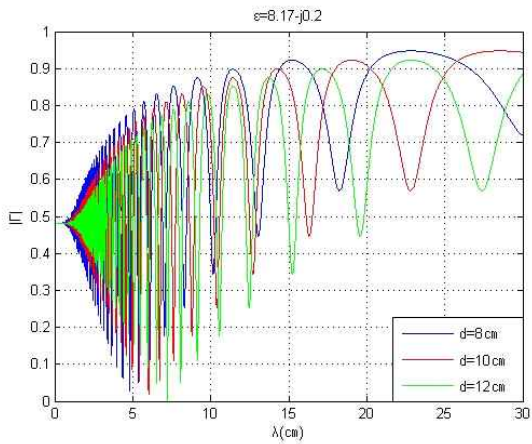
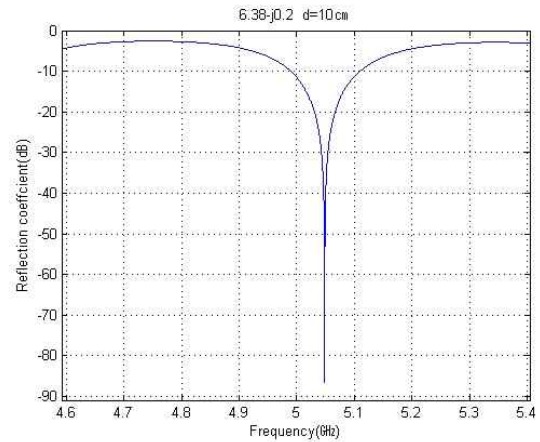
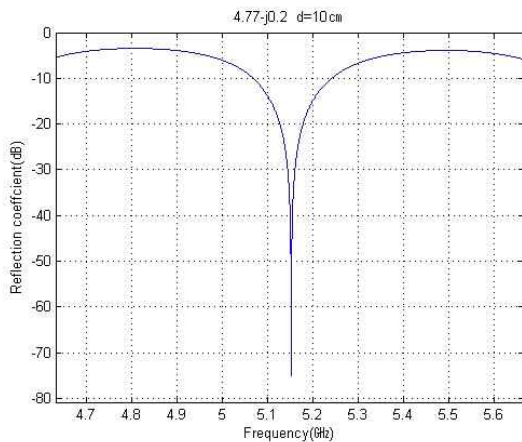
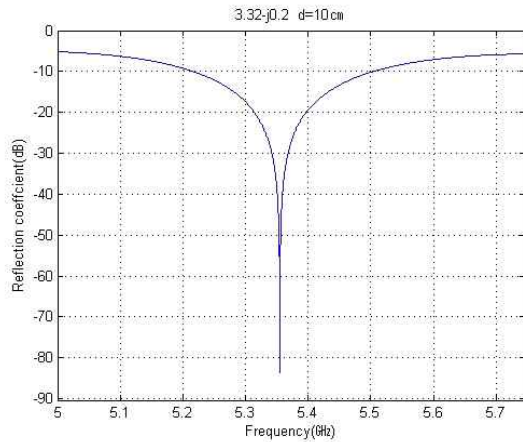
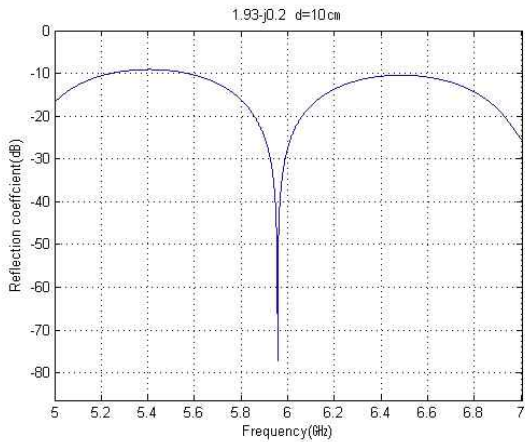


그림3. 유전체의 두께를 변화에 따른 반사계수 변화 측정

위 그래프에서 유전체의 두께가 두꺼워지면 최소 반사계수의 값이 오른쪽으로 유전체의 두께가 얇아지면 최소 반사계수의 값이 일정한 그래프 형태를 유지하면서 왼쪽으로 이동되는 것을 알 수가 있다. 즉 일정한 유전율을 갖는 유전체의 경우에는 두께를 조정해가면서 원하는 주파수 영역대의 전파흡수체를 설계할 수가 있다는 것을 알 수가 있다.



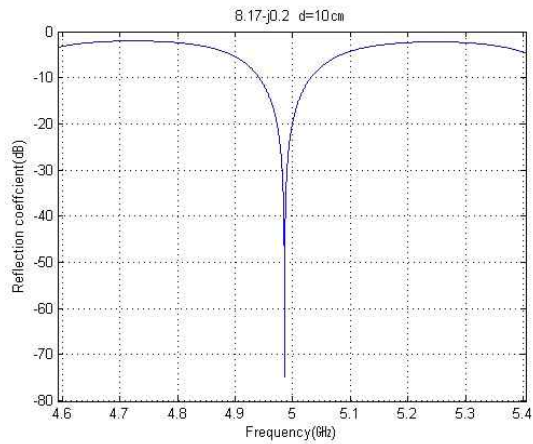
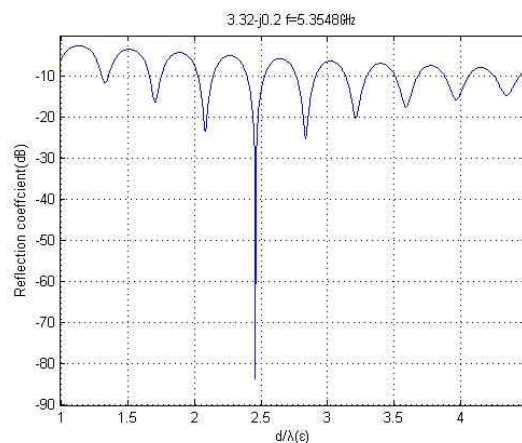
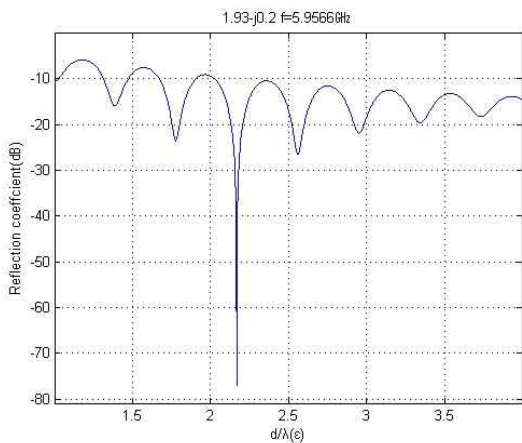


그림4. 협대역 단일주파수 흡수

위 그래프는 dB과 MHz로 단위를 바꾸어 최소 반사계수 값을 가지는 영역을 보여 준다. 단층형 전파흡수체를 설계 및 분석을 할 때 가장 중요한 것은 유전체 내부에 파장이 어떠한 주기성을 가지고 감소하는지 알아야만 전파흡수체를 설계할 때 각각의 층의 두께를 결정하여 다층형으로 적층시켜 나갈 수 있기 때문이다.





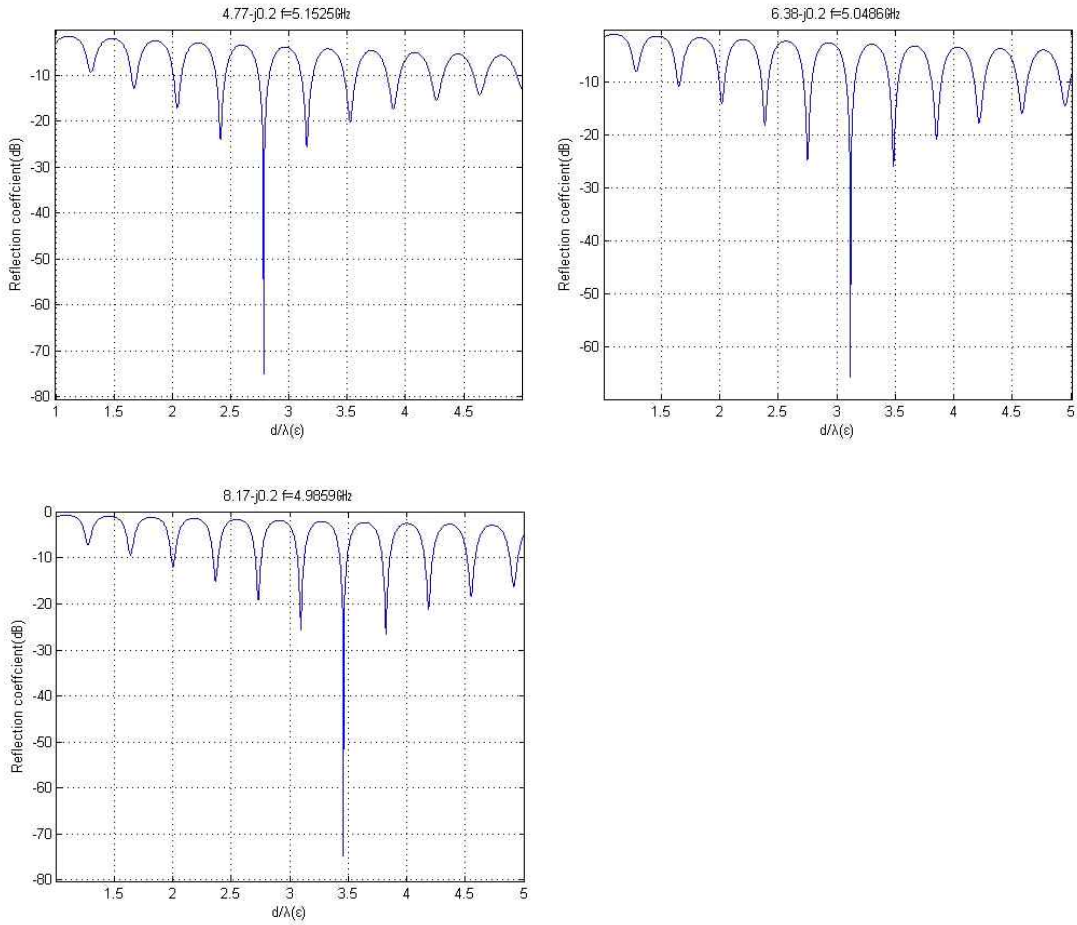


그림5. 두께 변화에 따른 유전체 내부의 파의 움직임

위 그래프는 dB과  $\frac{d}{\lambda_\epsilon}$ 로 두께를 변화시키면서 나타낸 그래프이다.  $\lambda_\epsilon$ 는 굴절률을 통해서 유전율의 실수부와 허수부로 표현될 수가 있다. 즉 다시 말해서  $m = \sqrt{\epsilon} = \sqrt{\epsilon' - j\epsilon''} = n - jk$ . 여기서 굴절률  $n = \text{Re} \sqrt{\epsilon}$  실수부의 항으로 표시될 수 있다.  $m, k$ 를 유전율을 통해 다시 식을 변형하면  $m = \frac{\sqrt{|\epsilon| + \epsilon'}}{\sqrt{2}}$ ,  $k = \frac{\sqrt{|\epsilon| - \epsilon'}}{\sqrt{2}}$ 로 표현될 수 있고 결국  $\frac{d}{\lambda_0} \cdot \text{Re} \sqrt{\epsilon} = \frac{d}{\lambda_\epsilon}$ 의 관계가 성립하게 된다. 위 그래프를 자세히 보면 dB의 그래프가 일정한 주기를 가지고 감소하는 것을 알 수가 있다. 이론적으로는  $\frac{d}{\lambda_\epsilon} = 0.5$ 의 주기성을 가지고 감소한다. 그러나 위 그래프에서는 0.5보다 약간 작은 값을 가지는 주기성으로 나타나고 있다. 이러한 이유는 컴퓨터 프로그래밍 과정에서 파마미터들에 대한 공차의 간격을 더욱더 줄여나가면 0.5에 더욱더 근접한 결과를 얻을 수 있을 것이다. 이러한 결론은 재

료를 2층 및 다층형으로 적층해나갈 때 재료의 두께를 결정할 수 있는 중요한 요소가 된다.

이렇게 5가지 경우의 단층형 전파흡수체를 설계 및 분석하면서 여러 가지 중요한 사항을 알 수가 있었고 이것은 곧 2층형 및 다층형 전파흡수체를 설계 및 분석하는데 기초적인 요소가 될 수 있을 것이다.

## 2.2 2층형 전파흡수체 설계 및 해석

단층형 전파흡수체를 광대역화 하기 위해 만든 것으로 층수가 두 장인 것이다. 사용주파수 범위를 넓히기 위해 이면에 금속을 붙인 층에서 전파를 흡수하고 전면의 층에서 공기의 전파특성 임피던스로 정합되도록 설계한다.

2층으로 적층된 유전체의 최소화된 반사계수를 구하기 위해서는 우리가 원하는 주파수대역에서의 첫 번째 층에 대한 액티브적인 임피던스를 결정해야만 한다. 여기서 말하는 액티브적인 임피던스란 입력임피던스의 허수부가 0에 근접하는 임피던스를 의미한다. 이러한 액티브적인 임피던스를 얻어낼 수 있는 손실탄젠트  $\tan\delta = \frac{\epsilon''}{\epsilon'}$ 의 값이 대략 0.87에 가까워진다는 것을 수치해석적인 모델을 통해 알아 낼 수 있었다. 이때 첫 번째 층의 두께는 단층형 전파흡수체의 두께를 결정할 수 있는 조건인  $\frac{d_1}{\lambda_0} \cdot Re \sqrt{\epsilon} = \frac{1}{4}$ 을 통해서 구할 수 있다. 이러한 조건을 통해서 첫 번째 층에 대한 파라미터들을 결정할 수가 있다.

주파수를 6GHz로 고정시킨 후 수치해석적인 컴퓨터 프로그래밍으로 파라미터들을 결정해 아래 표2에 나타내었다.

Frequency = 6GHz ( $\lambda=5\text{cm}$ )					
1st Layer					
$\epsilon'$	$\epsilon''$	d[cm]	Z[ $\Omega$ ]	$\tan\delta$	$\Gamma$
7.65	6.58	0.5465	152.2-j0.491	0.86	0.4248
8.33	7.23	0.5235	145.04+j0.36	0.868	0.4443
9.73	8.46	0.4835	134.47+j0.578	0.869	0.4742
10.47	9.11	0.4682	128.51+j0.38	0.87	0.4916
11.95	10.43	0.4387	119.81+j0.537	0.873	0.5177

표2. 첫 번째 층의 대한 파라미터

만일 첫 번째 층의 유전체의 두께가  $\frac{\lambda}{4}$  혹은  $d_1 = \frac{\lambda}{4} + \frac{n \cdot \lambda}{2}$  ( $n = 1, 2, 3 \dots$ ) 이



때 입력임피던스는  $\overline{Z}_{n2}(d_1 + d_2) = \frac{\overline{Z}_{02}^2}{\overline{Z}_{n1}}$  으로 결정할 수 있다.  $|\Gamma|=0$  인 경우에는 입력임피던스와 특성임피던스는 동일한 크기를 가지게 되고, 윗 식은 다시 유전율을 통해  $\overline{Z}_{02}^2 = Z_0 \cdot \overline{Z}_{n1} = \left(\frac{Z_0}{\sqrt{\epsilon_2}}\right)^2$  으로 변형될 수 있다. 결국 수직 입사파의 경우의 반사계수를 고려한 첫 번째 층과 두 번째 층의 적층 시킬 때의 조건인  $\sqrt{\epsilon_1} = \sqrt{\epsilon_2}$ 이 성립하게 되고 이 식을 통해서 두 층간의 유전율의  $\epsilon'$ 와  $\epsilon''$ 의 상관관계성을 구할 수 있다.

마지막으로 두층 간의 유전체 두께를 결정할 수 있는 조건을 알아보자. 첫 번째 층의 유전체 두께를 결정하기 위해서는 다음의 조건이 성립해야 했다.

$$\frac{d_1}{\lambda_0} \cdot Re \sqrt{\epsilon} = \frac{1}{4}, \lambda_0\text{-공기 중의 파장}$$

단층형 전파흡수체의 경우에서  $\frac{d}{\lambda_0} \cdot Re \sqrt{\epsilon} = \frac{d}{\lambda_\epsilon} = \frac{1}{2}$  의 조건을 이용해서 두 번째 층의 두께 또한  $d_2 = \frac{\lambda_\epsilon}{4} = \frac{\lambda_0}{4 \cdot Re \sqrt{\epsilon_2}}$  조건을 통해서 결정할 수가 있다.

만약 첫 번째층 에서 임피던스를 결정할 때 패시브적인 임피던스를 결정한다면 2층으로 적층 시켰을 경우에 위 표1보다 반수계수( $|\Gamma|$ )의 계수가 더 큰 계수가 산출되기에 반드시 첫 번째 층에서는 액티브적인 임피던스를 결정해야만 한다. 여기서 말하는 패시브적인 임피던스란 입력임피던스의 복소수항의 값이 0에 가깝지 않고 다른 값을 가지는 경우를 의미한다.

이러한 조건을 통해 두 번째층의 유전체에 대한 파라미터를 결정할 수 있고 표3에 나타내었다.

Frequency = 6GHz ( $\lambda=5\text{cm}$ )				
2nd Layer				
$\epsilon'$	$\epsilon''$	d[cm]	Z[ $\Omega$ ]	$ \Gamma $
2.965	1.1096	0.9312	247.46+j24.535	0.211
3.1113	1.1619	0.9116	242.55+j20.82	0.2195
3.3633	1.2577	0.8804	234.95+j16.14	0.2335
3.4892	1.3055	0.8659	232.16+j13.321	0.2387
3.729	1.3985	0.8403	225.93+j9.284	0.251

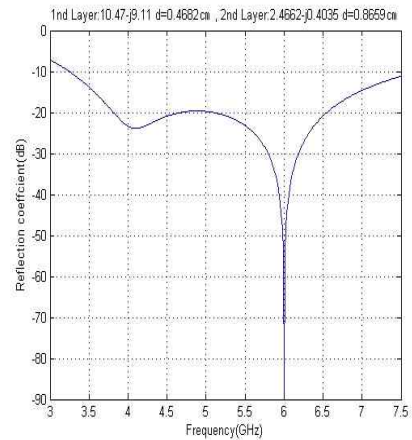
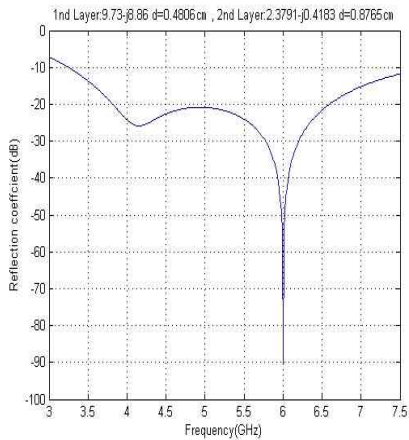
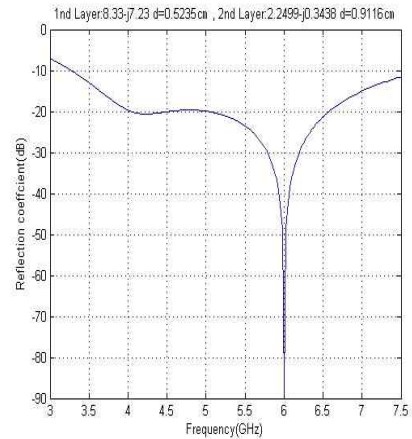
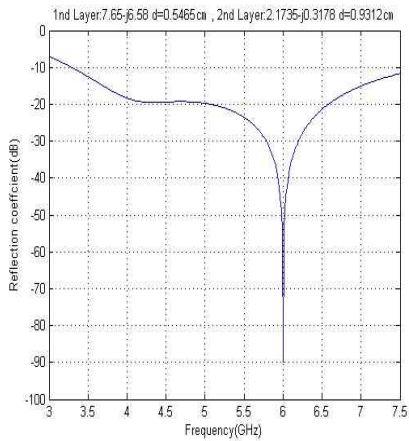
표3 두 번째 층의 대한 파라미터

구해진 파라미터 중 임피던스는 패시브적인 임피던스를 갖는다는 것을 알 수가 있다. 공기 중의 임피던스의 값은  $Z_{air} = 377\Omega$ 이다. 이때 표2의  $\epsilon'$ 와  $\epsilon''$ 의 값을 조정하여 Z[ $\Omega$ ]의 값이  $Z_{air} = 377\Omega$ 에 근접하도록 변환시켜야 한다. 위의 정합 조

건이 성립하면 그때 최소 반사계수를 갖는다는 것을 알 수가 있다. 이렇게 최소 반사계수를 갖도록  $\epsilon'$ 와  $\epsilon''$ 을 변환시킨 값을 표3에 나타내었고 각각의 경우의 그래프를 나타내었다.

Frequency = 6GHz ( $\lambda=5\text{cm}$ )						
2nd Layer						
$\epsilon'$	$\epsilon''$	d[cm]	Z[ $\Omega$ ]	$ \Gamma $	dB	$\Delta f/f(\text{ave}):-40\text{dB} \downarrow$
2.1735	0.3178	0.9312	$377+j0.016$	0.000032	-90.0238	0.021
2.2499	0.3438	0.9116	$377-j0.027$	0.000036	-88.9663	0.021
2.3877	0.3775	0.8804	$377-j0.022$	0.000029	-90.8773	0.021
2.4662	0.4035	0.8659	$377-j0.028$	0.000037	-88.5216	0.02
2.5997	0.4399	0.8403	$377-j0.0021$	0.000004	-107.774	0.0197

표4 공기 중의 임피던스에 근접하게 변형시킨 두 번째층의 파라미터



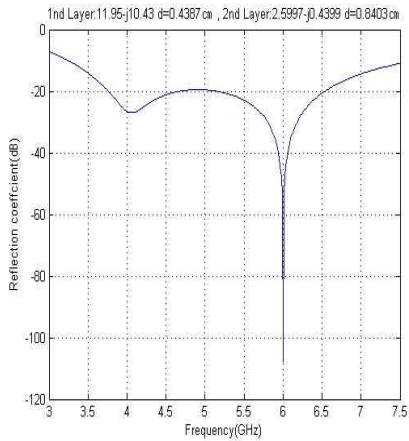
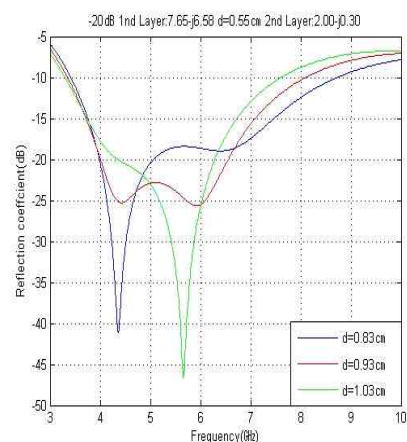
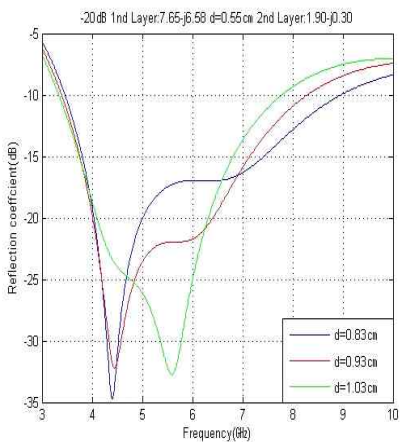


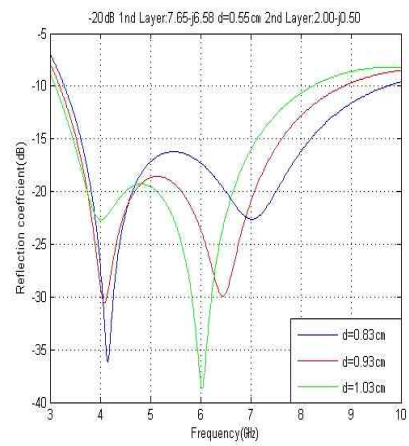
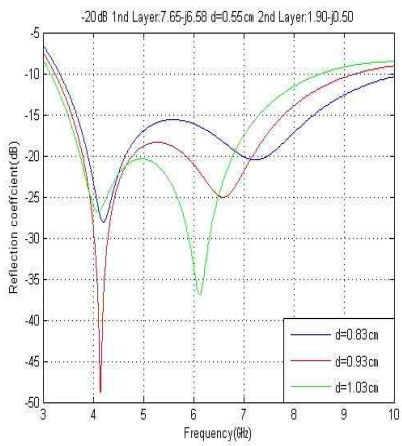
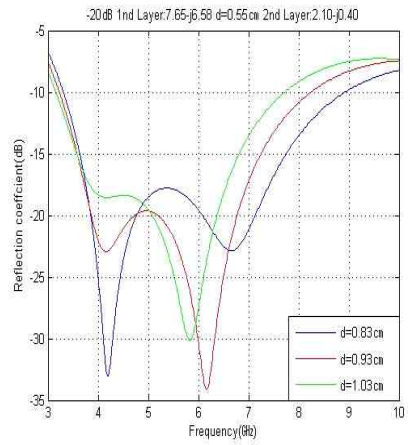
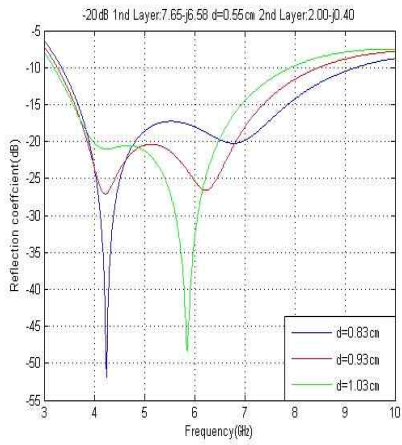
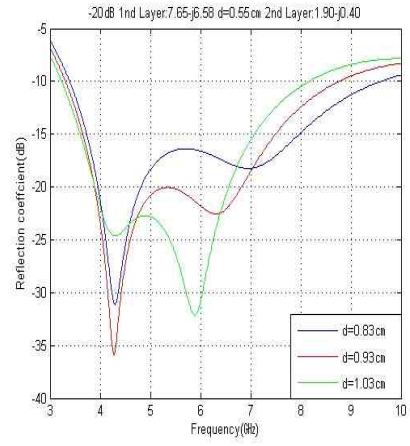
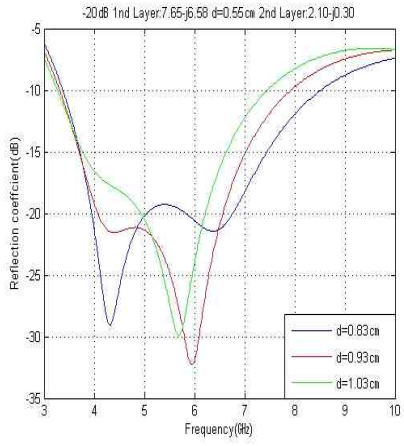
그림6. 2층 전자파 흡수 적층판의 성능

위 그래프는 dB과 GHz에 관련된 두개의 유전체를 적층시켰을 때의 전자파 흡수 성능을 보여준다. 그러나 위 그래프는 6GHz에서는 상당한 흡수 능력을 보여주지만 그래프가 -20dB 이상을 벗어나 만족할만한 주파수 대역의 흡수 능력을 보여주지 못한다.

광대역 주파수대의 흡수 능력을 만족하기 위해서 Powell의 컨주게이트 방향법 [4]을 사용하여 또다시 표3의 파라미터들의 값을 변형시켜가면서 가장 넓은 범위의 흡수 능력을 보여주는  $\epsilon'$  와  $\epsilon''$ 와 두께 d를 다시 수정을 해야 한다. 이렇게 파라미터들을 수정하면서 3가지 경우를 고려해 보았다.

① -20dB 이하에서 가장 넓은 주파수 대역의 흡수 능력을 가지는 경우





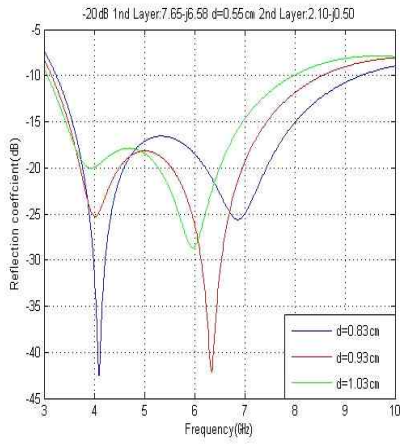
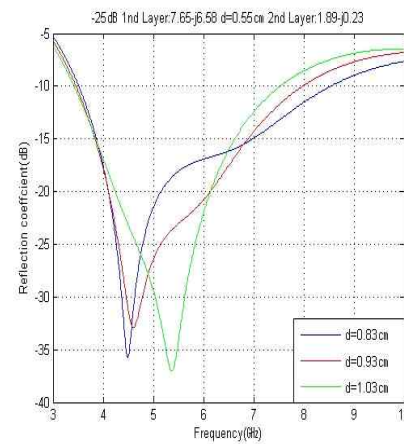
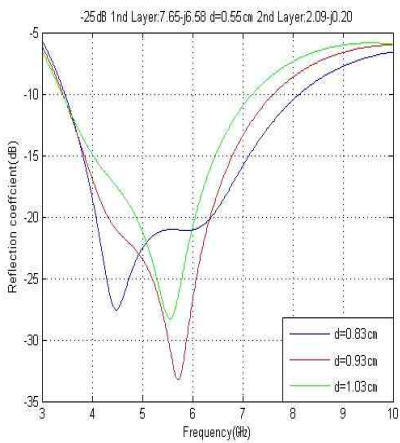
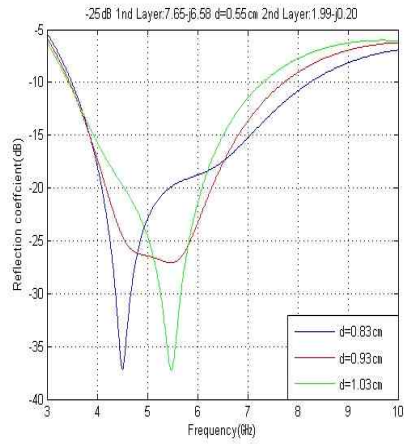
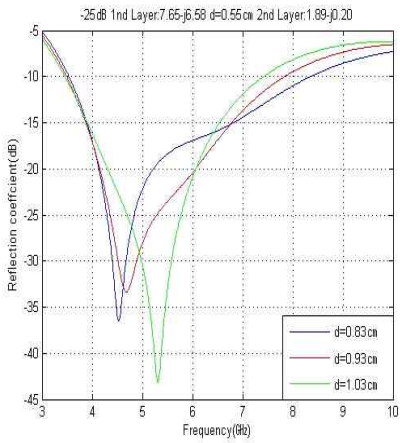


그림7. -20dB이하 유전율, 두께를 변화에 따른 전파흡수 변화

② -25dB 이하에서 가장 넓은 주파수 대역의 흡수 능력을 가지는 경우



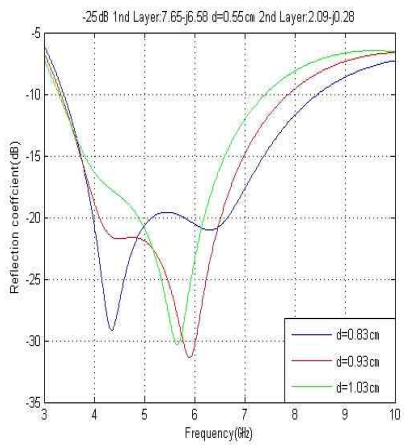
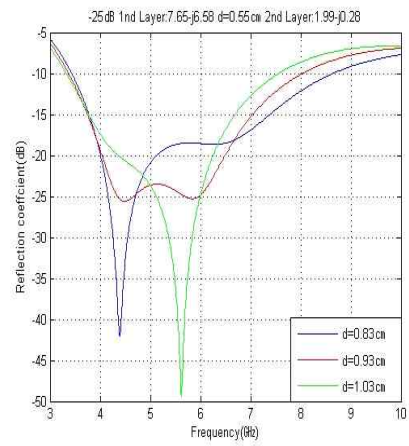
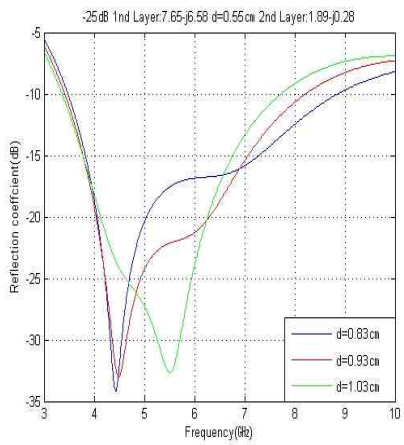
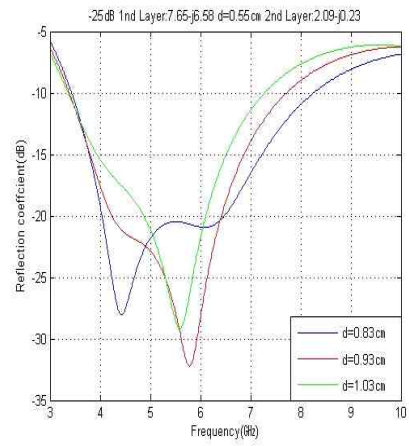
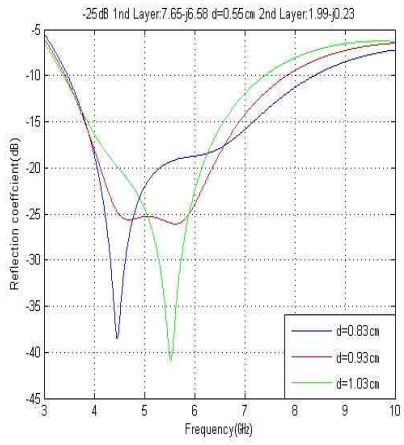
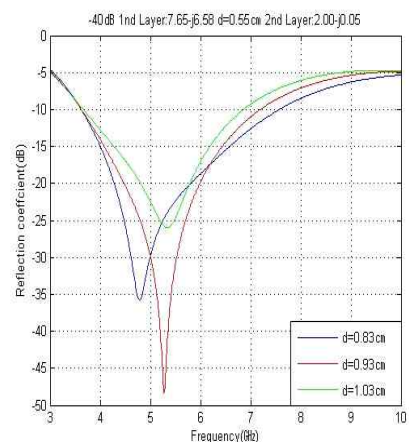
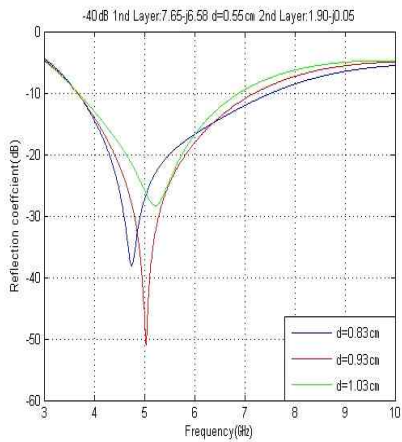
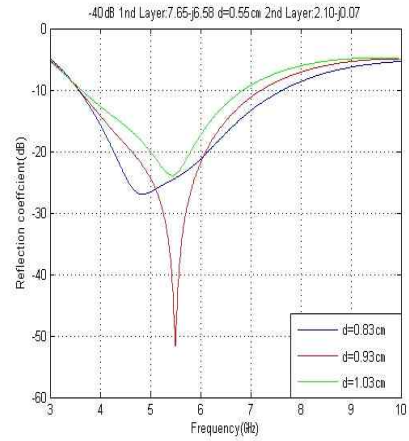
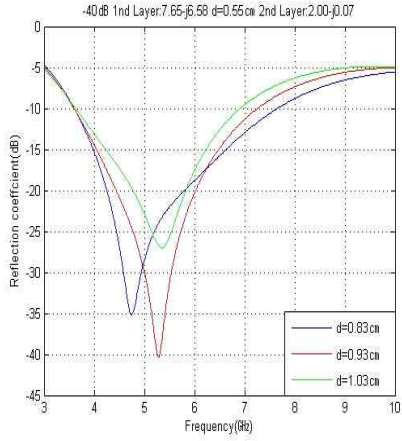


그림8. -25dB이하 유전율, 두께를 변화에 따른 전파흡수 변화



③ -40dB 이하에서 가장 넓은 주파수 대역의 흡수능력을 가지는 경우





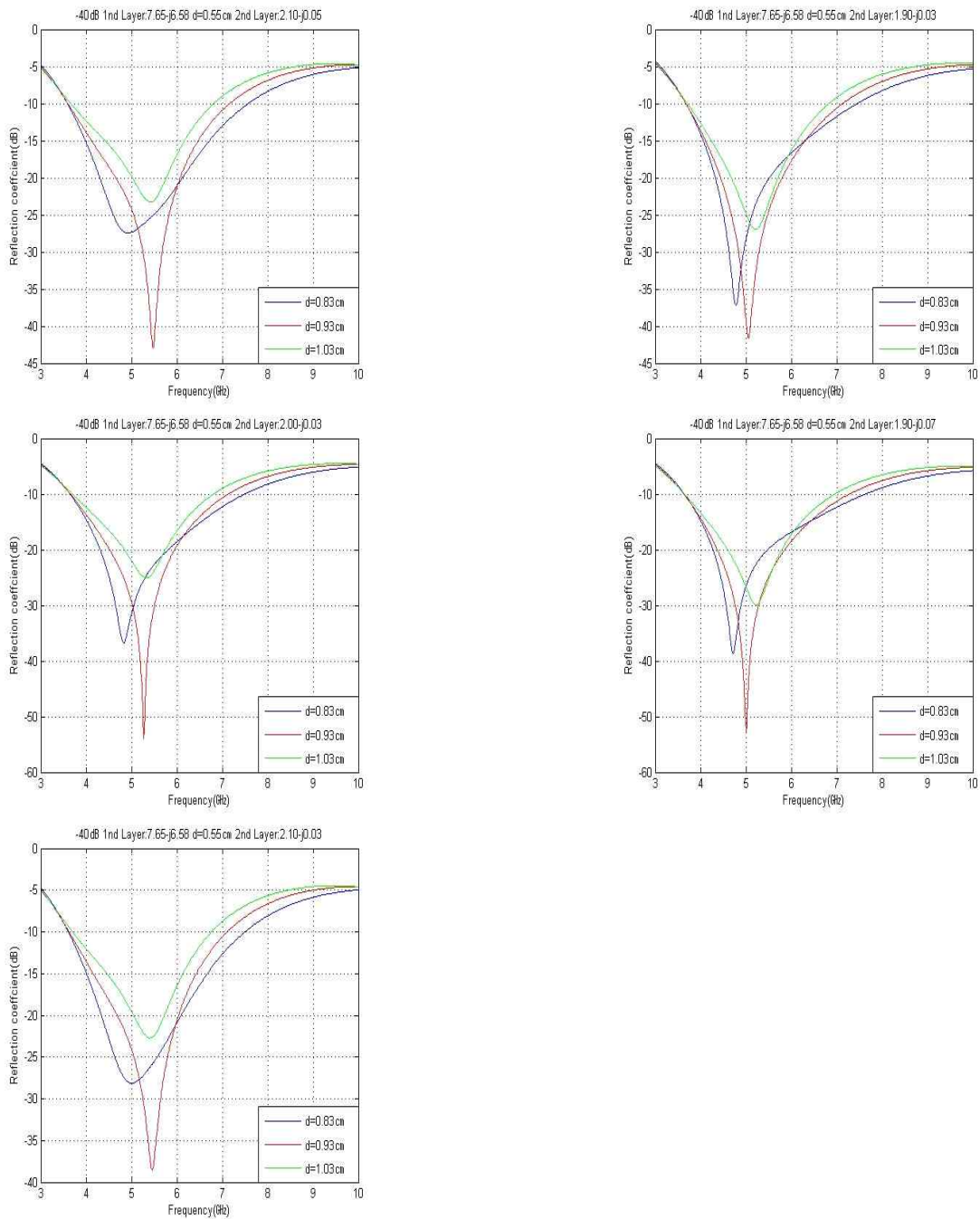


그림8. -40dB이하 유전율, 두께를 변화에 따른 전파흡수 변화

위의 그림과 같이 Powell의 컨주게이트 방향법을 사용하여 각각의 경우의  $\epsilon'$ 와  $\epsilon''$ 와 두께  $d$ 를 변화시키면서 주파수대의 흡수 능력을 찾아 본 결과 이미 많은 부분에서 좋은 흡수 능력을 보여준다. 하지만 이러한 데이터 중에서 가장 넓은 주파수대의 흡수 능력을 가지는 3가지 영역의 경우를 찾아 아래 표5와 그림9로 나타내었다.

1st Layer : 7.56-j6.58 d=0.55cm					
dB	2nd Layer	d[cm]	$\Delta f$ [GHz]	f(ave)[GHz]	$\Delta f/f$
-20	2.00-j0.40	0.93	3.859~6.826	5.13	0.578
-25	1.99-j0.23	0.93	4.486~5.888	5.07	0.277
-40	2.00-j0.05	0.93	5.198~5.350	5.276	0.029

표5. 광대역 주파수대의 흡수 능력을 가지는 파라미터

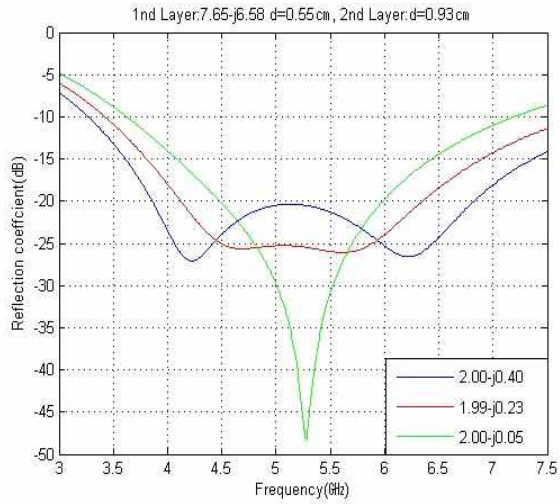


그림9. 2층형 진파흡수 적층판의 성능

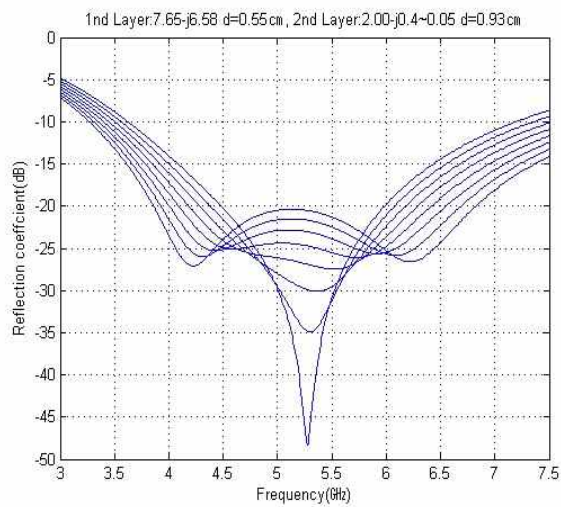


그림10. 유전율 허수부 변화에 따른 진파 흡수 적층판의 성능

다른 경우의 데이터들도 동일한 방법으로 찾아 아래의 표와 그림으로 나타내었다.

1st Layer : 8.33-j7.23 d=0.52cm					
dB	2nd Layer	d[cm]	$\Delta f$ [GHz]	f(ave)[GHz]	$\Delta f/f$
-20	2.07-j0.43	0.91	3.864~6.890	5.156	0.587
-25	2.07-j0.25	0.91	4.450~6.047	5.057	0.316
-40	2.07-j0.05	0.91	5.219~5.382	5.302	0.031

표6. 광역 주파수대의 흡수 능력을 가지는 파라미터

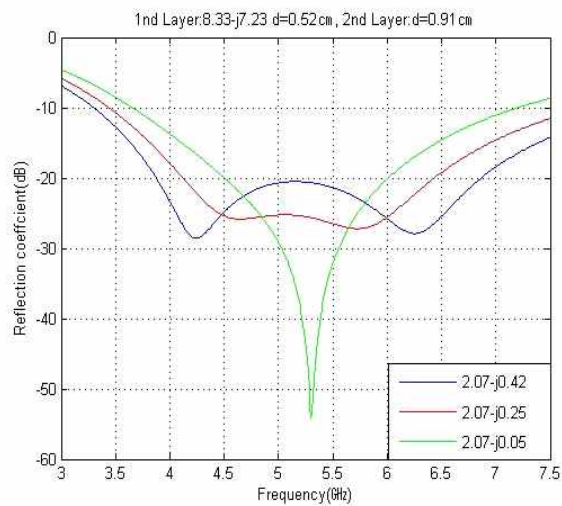


그림11. 2층형 전파 흡수 적층판의 성능

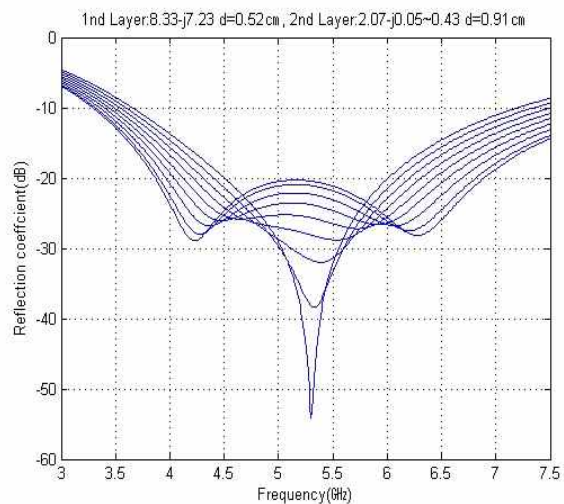


그림12. 유전율 허수부 변화에 따른 전파 흡수 적층판의 성능

1st Layer : $9.73-j8.46$ $d=0.48\text{cm}$					
dB	2nd Layer	$d[\text{cm}]$	$\Delta f[\text{GHz}]$	$f(\text{ave})[\text{GHz}]$	$\Delta f/f$
-20	$2.23-j0.43$	0.88	3.862~6.781	5.111	0.571
-25	$2.21-j0.26$	0.88	4.318~6.039	5.099	0.338
-40	$2.21-j0.05$	0.88	5.162~5.338	5.252	0.034

표7. 광역 주파수대의 흡수 능력을 가지는 파라미터

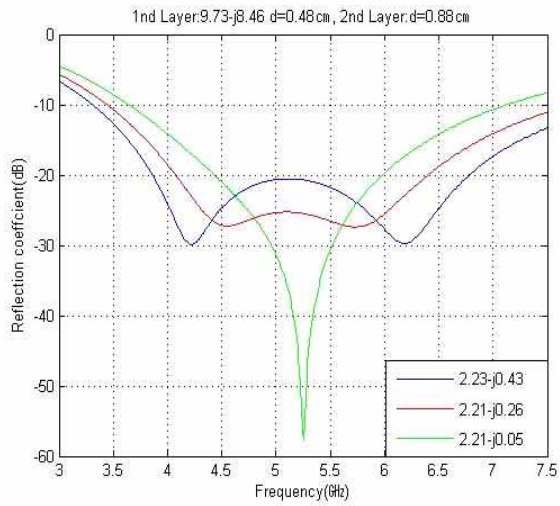


그림13. 2층형 전파 흡수 적층판의 성능

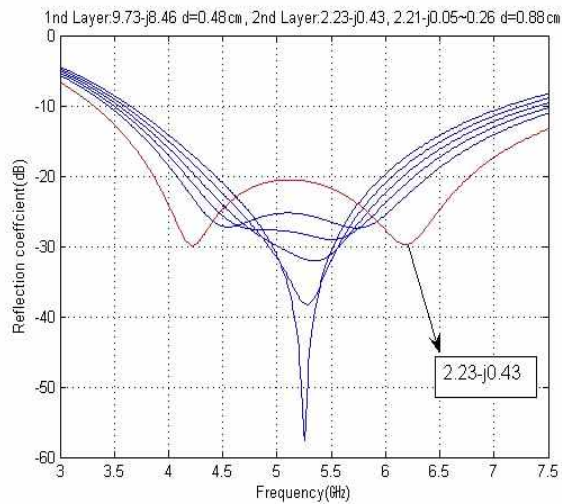


그림14. 유전율 허수부 변화에 따른 전파 흡수 적층판의 성능

1st Layer : 10.47-j9.11 d=0.46cm					
dB	2nd Layer	d[cm]	$\Delta f$ [GHz]	f(ave)[GHz]	$\Delta f/f$
-20	2.32-j0.44	0.86	3.867~6.787	5.112	0.571
-25	2.29-j0.25	0.86	4.329~6.050	5.106	0.337
-40	2.29-j0.05	0.86	5.175~5.361	5.271	0.035

표8. 광역 주파수대의 흡수 능력을 가지는 파라미터

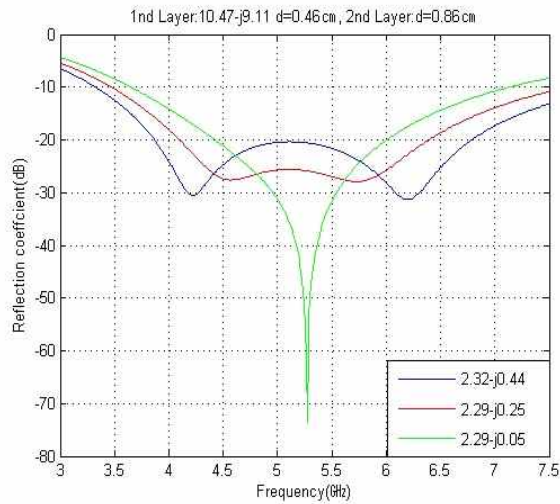


그림15. 2층형 전파 흡수 적층판의 성능

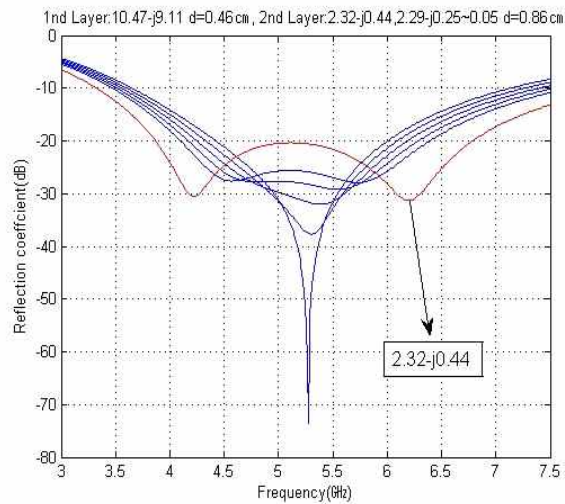


그림16. 유전을 허수부 변화에 따른 전파 흡수 적층판의 성능

1st Layer : $11.95-j10.43$ $d=0.44\text{cm}$					
dB	2nd Layer	$d[\text{cm}]$	$\Delta f[\text{GHz}]$	$f(\text{ave})[\text{GHz}]$	$\Delta f/f$
-20	$2.50-j0.42$	0.84	3.792~6.565	4.991	0.556
-25	$2.48-j0.23$	0.84	4.196~5.917	4.966	0.347
-40	$2.48-j0.03$	0.84	5.071~5.254	5.166	0.035

표9. 광역 주파수대의 흡수 능력을 가지는 파라미터

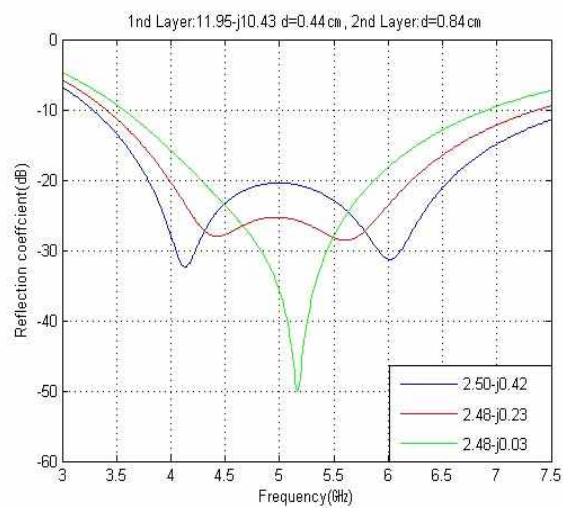


그림17. 2층형 전파 흡수 적층판의 성능

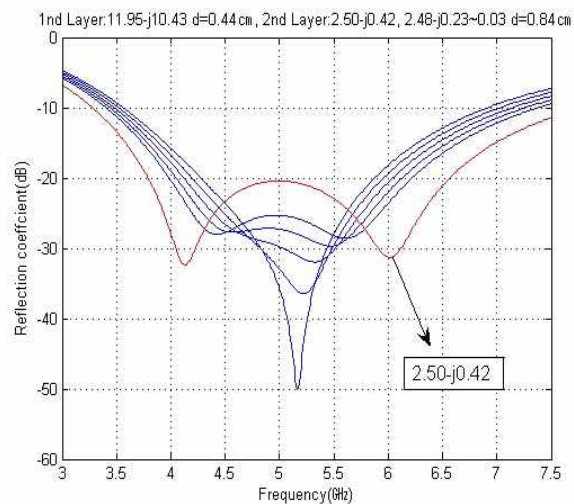


그림18. 유전율 허수부 변화에 따른 전파 흡수 적층판의 성능

### 3. 결 론

전자기기들의 발달로 인하여 레이더의 운용 주파수의 광대역화로 인하여 최근 들어서는 전자파 흡수 문제에서 광역주파수 스펙트럼 전파흡수체의 개발이 필수적이다.

광역주파수 스펙트럼 전파흡수 적층판의 최적화를 위하여 적층판을 이루는 각 층의 유전율과 두께를 결정해 보았고, 이러한 광대역 주파수 스펙트럼 전파흡수체를 설계하기 위해서는 위에서 보인 결과와 같이 단층형으로 제작할 때 보다 서로 다른 재료를 다층형으로 적층할 때가 더욱더 넓은 광대역 주파수 스펙트럼 전파흡수체를 설계할 수 있을 것이고 전파흡수체 두께 또한 월등히 줄어드는 것을 알 수가 있다.

다층형으로 적층시킬 때 전파흡수체는 넓은 주파수 대역에서 작은 반사율을 가질 수 있고 동시에 얇고 가벼울 수 있는 경쟁력을 가질 수가 있을 것이다.

이 원고에서는 유전율의 허수부인 손실 항 즉  $\epsilon'' \neq 0$ 인 경우를 다루어 보았다. 만일 전파흡수체에 자성재료처럼 자성성분을 포함하게 된다면  $\mu = \mu' - j\mu''$  성분을 포함하기에 손실 항이 두 개가 존재하게 된다. 이것은 당연히 손실 항이 하나일 때보다 더 좋은 흡수영역을 가지게 될 것이고 위의 방법과 같이 파라미터  $\mu = \mu' - j\mu''$  성분을 고려하여 같은 방법으로 컴퓨터 모델링을 거쳐 해결해 나갈 수 있을 것이다.

따라서 더욱더 경쟁력 있는 기술력을 보유하기 위해서는 유전율과 투자율을 동시에 다룰 수 있는 다양한 재료가 조합된 새로운 재료와 전자기적 특성에 대한 연구가 필수적이다.

### 4. 참고 문헌

- [1] 한국기계연구원: 김태욱, 김진봉 “전자파 흡수 복합재료 기술 서론 발췌”
- [2] David M. Pozar "Microwave Engineering Chapter 2"
- [3] J. Perini, L. Cohen. "Design of Broadband Radar Absorbing Materials for Large Angles of Incidence". IEEE Tran. on Electromagnetic Compatibility. Vol.35. No.2. May 1993.
- [4] Загоскин В.В., Катаев С.Г., Тюльков Г.И., Чернышов В.Н. Влияние тепловлажностных факторов на пространственное распределение диэлектрических характеристик в капиллярно-пористых средах с проводящим компонентом на сверхвысоких частотах.-Изв. вузов. Физика, 1996, N10-С.50
- [5] Шутко А.М. СВЧ-Радиометрия водной поверхности и почвогрунтов. М: Наука, 1986. 190с.
- [6] Ланндау Л.Д., Лифшиц Е.М. Теория поля.