

# 메타 물질 코어를 갖는 A-Sandwich 레이돔 전파 특성 해석

## Analysis of A-Sandwich Radome with Metamaterials Core

이경원 · 홍익표\* · 박범준\*\* · 정영철 · 육종관

Kyung-Won Lee · Ic-Pyo Hong\* · Beom-Jun Park\*\* · Yeong-Chul Chung · Jong-Gwan Yook

### 요 약

본 논문에서는 recursive method를 이용하여 A-Sandwich 레이돔 코어 물질을 유전체, 드루드(Drude) 모델, 이상적인 메타 물질로 각각 가정하고 레이돔의 특성을 비교 분석하였다. 기존의 유전체 레이돔보다 이상적인 메타 물질을 사용함으로써 우수한 성능을 얻을 수 있음을 증명하였으며, 분산 메타 물질의 경우 물질 상수 변화가 작은 주파수 대역을 사용함으로써 유전체 레이돔보다 좋은 성능을 얻을 수 있음을 보였다. 또한 레이돔에 메타 물질을 적용하기 위한 스킨과의 관계 및 조건을 제안하였다. Ku band 주파수 대역에서 사용 가능한 레이돔을 분석하였으며, 레이돔의 주요 성능 파라미터인 삽입 손실, 삽입 위상 지연, 편파 부정합에 대해 유전체 레이돔과 메타 물질 레이돔의 전파 특성을 비교하였다. 코어가 주파수 분산 메타 물질일 경우 굴절 지수 -1과 가까운 주파수 대역에서 유전체를 코어로 갖는 레이돔에 비해 우수한 레이돔 성능을 가짐을 알 수 있었으며, 본 논문의 결과로부터 일반적인 유전체 레이돔에 비해 메타 물질 코어를 갖는 레이돔으로부터 개선된 전파 특성을 갖는 레이돔 특성을 얻을 수 있다는 것을 확인하였으며, 레이돔 설계 및 개발에 활용할 수 있다.

### Abstract

In this paper, dielectric, drude model and ideal metamaterial are applied to core of A-Sandwich radome and each radome is analyzed using recursive method in Ku band. The main parameters of radome performance are insertion loss, insertion phase delay and depolarization. In case of ideal metamaterial, the radome using ideal metamaterial dose not generate depolarization because insertion loss, insertion phase delay and loss for incidence angle of wave do not happened. If circular polarization wave is incident on radome with meta material, transmitted wave also keeps circular polarization. In case of the dispersive metamaterial, the performance of radome using dispersive metamaterial is better than it of radome using dielectric in a part of frequency band. From these results, it is showed that metamaterial can be applied to various radome structure.

Key words : A-Sandwich Radome, Meta Material, Recursive Method, Insertion Loss, Insertion Phase Delay, Depolarization

### I. 서 론

정보화 사회로의 급속한 발전 추세에 따라 무선 통신, 이동 통신에 적용될 수 있는 안테나 및 마이크

로파 회로의 응용 범위는 바이오 기술과 나노 기술 등 정보 기술과 융합 분야 등으로 다양해지고 있으며, 따라서 그 중요성 또한 증가하고 있다. 학제간 융합을 비롯한 다양한 학문 분야에서 이러한 회로의

「본 논문은 국방과학연구소 연구용역과제(계약번호: UD070087KD)에 의하여 수행된 연구 결과임.」

연세대학교 전기전자공학과 (Dept. of Electrical and Electronics Engineering, Yonsei University)

\*공주대학교 정보통신공학부 (Dept. of Information and Communication Engineering, Kongju University)

\*\*국방과학연구소 (Agency for Defense Development)

· 논문 번호 : 20090723-073

· 수정완료일자 : 2009년 11월 6일

설계 기술에 대한 연구가 이루어지고 있으며, 그 중 메타 물질과 같은 전자기 신소재를 이용한 마이크로 파 응용 회로에 관한 연구의 필요성은 점차 증가하고 있다.

메타 물질은 1968년 Veselago<sup>[1]</sup>에 의해 처음 제안된 유전율과 투자율이 모두 음의 값을 갖는 자연에서 일반적으로 발견할 수 없는 특수한 전자기 성질을 보여주기 위해 설계된 인공적인 구조를 가진 물질이다. 메타 물질은 NIM(Negative Index Material), DNG(Double Negative), LHM(Left Handed Material), BW(Backward Wave) 매질, EBG(Electromagnetic Band Gap) 구조, 또는 Hi-impedance(hi-z) 평면 구조 등으로 불려진다. 1996년 Pendry<sup>[2]</sup>에 의해 금속성 막대로 이루어진 주기적 격자 구조의 유효 유전율이 특정 주파수 대역에서 음의 값을 갖는다는 사실과 슬롯을 가진 원형 공진기 구조의 유효 투자율이 특정 주파수 대역에서 음의 값이 된다는 사실이 밝혀지면서 메타 물질에 관한 연구가 각광을 받기 시작하였다<sup>[3]</sup>. 2001년 Shelby<sup>[4]</sup>는 메타 물질을 이용하여 DNG 물질을 구현하고 이를 통해 얻은 실험적 결과가 이론적으로 예상되었던 결과와 일치한다는 것을 보여주었다. 최근에는 메타 물질의 실험적 구현뿐만 아니라 이론적 해석 및 수치 해석법을 이용한 분석, 마이크로 파 응용 회로도 활발히 연구되고 있다<sup>[5]</sup>.

메타 물질 slab과 관련하여 2000년 Pendry<sup>[6]</sup>는 메타 물질 slab이 Perfect lens에 적용될 수 있다는 것을 수식으로 유도하였고, Ramakrishna<sup>[7]</sup>는 메타 물질 slab과 유전체 slab을 결합하여 evanescent mode를 증폭할 수 있다는 것을 보였다. 또한, Zhang<sup>[8]</sup>은 메타 물질 slab에서의 전자기파의 전파에 대해 연구하였으며, Kong<sup>[9]</sup>은 다층 구조를 갖는 메타 물질에서 전자기파의 일반적인 해를 유도하였다. 2003년 H. Cory와 C. Zach<sup>[10]</sup>는 recursive 방법을 이용하여 유전체로 구성된 다층 구조와 메타-유전체로 구성된 다층 구조에 대해 해석하였으며, 메타 물질을 이용한 antireflection coating과 high-reflection coating에 대해 연구하였다. 기존 연구 결과들 대부분은 다층 구조 해석을 위해 recursive method를 사용하였는데, 이는 물질의 손실 특성을 고려하기에 계산의 복잡성을 갖는다는 단점이 있다. 초기에 메타 물질 연구는 비손실을 가정으로 이루어졌지만<sup>[6]</sup>, 2002년 Garcia<sup>[11]</sup>는

실제 메타 물질은 메타 물질의 주파수 분산 특성 때문에 손실 특성을 가져야 함을 보여주었고, 이후 손실 특성을 갖는 메타 물질 slab의 전달 함수<sup>[12]</sup> 등에 관련한 연구가 이루어지고 있다.

레이돔에 관한 연구는 2차 세계 대전 이후 레이더 시스템의 발달과 더불어 다양하게 수행되었으며, 선진국들을 중심으로 레이돔 해석, 물질에 대한 연구가 활발히 진행되었다. 레이돔(radome)이란 레이더(radar)와(dome)의 합성어로서 내부 통신 시스템을 외부의 기계적 열적, 환경적 요소들로부터 보호하기 위해 제작된 유전체 덮개를 말한다<sup>[13]</sup>.

본 논문에서는 레이돔에 이상적 메타 물질을 적용하거나 주파수 함수로 나타나는 물질 상수 값을 가지는 메타 물질을 적용한 A-Sandwich 레이돔의 전파 특성을 해석하였다. 전파 특성으로서 유전체, 분산 메타 물질, 이상적 메타 물질을 코어로 이용한 각각 레이돔의 성능 파라미터들인 삽입 손실, 삽입 위상 지연, 편파 부정합 특성을 비교 분석하였다.

## II. Sandwich 레이돔 구조 해석

### 2-1 A-Sandwich 레이돔

A-Sandwich 레이돔은 스킨-코어-스킨의 3개 층으로 구성되어 있으며, 유전체의 물질 상수가 high-low-high의 구조로 되어 있다. 그림 1에 A-Sandwich 구조를 나타내었다. 코어 및 스킨은 모두 손실이 없

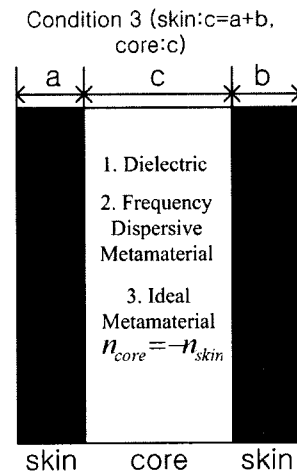


그림 1. A-Sandwich 레이돔 구조  
Fig. 1. A-Sandwich radome construction.

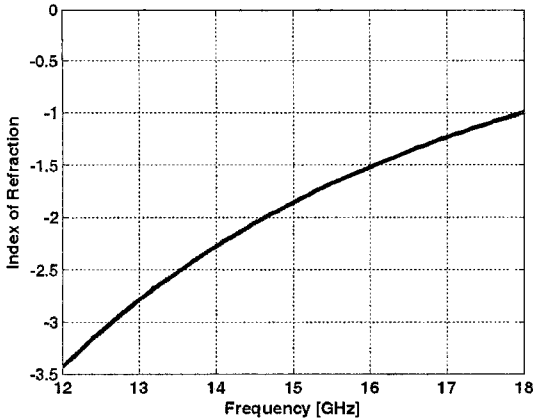


그림 2. 드루드 모델의 굴절 지수 변화  
Fig. 2. Refraction index of drude mode in Ku band.

다고 가정하였으며, 코어에는 각각 일반적인 유전체, 주파수 분산 특성을 갖는 메타 물질, 그리고 이상적인 메타 물질(유전율:  $-1$ , 투자율:  $-1$ )을 각각 가진다고 가정하였다.

본 논문에서는 A-Sandwich 레이돔 코어에 메타 물질을 적용하여 최상의 레이돔 성능을 얻기 위해 다음과 같은 조건을 제안하였다. 드루드 모델인 경우, 주파수에 따른 굴절 지수의 값이 서로 다른 값을 가지며, 굴절 지수가  $-1$ 보다 작은 값을 갖는 경우 경사 입사에 대해 우수한 레이돔 특성을 얻을 수 있다. 따라서, 그림 2와 같은 특성을 가지는 드루드 모델을 적용하였는데, 그림 2는 주파수에 따른 드루드 모델의 굴절 지수로 12 GHz에서  $-3.5$ , 18 GHz에서  $-1$ 까지 변화하는 물질 특성을 갖는다<sup>[14]</sup>.

이상적인 메타 물질(유전율:  $-1$ , 투자율:  $-1$ )인 경우, 첫 번째 조건은 스킨의 물질 상수와 코어의 물질 상수의 절댓값이 같고 부호가 반대가 되어야 한다. 이 조건은 레이돔의 스킨과 코어의 경계면에서의 반사 계수가 0이 되어 전체 반사 계수가 0이 되도록 만족한다. 두 번째 조건은 적용된 메타 물질 부분의 두께와 유전체 부분의 두께가 서로 같아야 된다는 것이다. 이 조건은 파가 전파하는 전기적 길이를 같게 함으로써 식 (2b)의 전체 반사 계수와 투과 계수의 지수함수 항을 상쇄되도록 함으로써 레이돔으로 인한 위상차가 없다. 따라서 코어가 이상적인 메타 물질 조건은 다음과 같이 식 (1)로 나타낼 수 있다.

표 1. 각 레이돔의 물질 파라미터  
Table 1. Material parameters of each radome.

	스킨의 두께	코어의 두께	스킨의 굴절율	코어의 굴절율
레이돔 1	0.5 mm	5 mm	1.79	1.05
레이돔 2	0.5 mm	5 mm	1.79	그림 2
레이돔 3	1.5 mm	3 mm	1.79	$-1.79$

$$n_{core} = -n_{skin} \tag{1a}$$

$$d_{core} = a_{skin} + b_{skin} \tag{1b}$$

각 경우에 대해 본 논문에서는 표 1과 같이 레이돔의 물질 파라미터를 가정하였다. 여기서 레이돔 1 구조는 코어가 유전체 레이돔, 레이돔 2 구조는 코어가 드루드 모델로 나타나는 메타 물질을 나타내며, 레이돔 3 구조는 코어에 이상적인 메타 물질을 적용한 레이돔을 나타낸다.

### 2-2 Recursive Method를 이용한 Radome 해석

본 논문에서는 다층 구조 레이돔을 해석하기 위해 recursive method를 이용하였다<sup>[10],[15]</sup>. 그림 3은 recursive method의 메커니즘을 나타내고 있다. 이 메커니즘을 바탕으로 식 (2)와 같은 반사 계수와 투과 계수를 얻을 수 있다. 여기서  $r_{i+1,i}$ 와  $t_{i+1,i}$ 는 각각의  $i$  번째 slab과  $i+1$  번째 slab의 경계 면에서의 반사 계수와 투과 계수이며,  $R_{i-1}$ 과  $T_{i-1}$ 은 다층 구조 전체의 반사 계수와 투과 계수이다. 식 (2)는 메타 물질까지 포함하는 일반적인 반사 계수 및 투과 계수 식으로, 여기서 지수 함수의 위상  $\phi_i$ 는  $i$  번째 slab의 위상이며,  $+$ 는 메타 물질에 대한 것이며,  $-$ 는 유전 물질에 해당된다<sup>[10]</sup>.

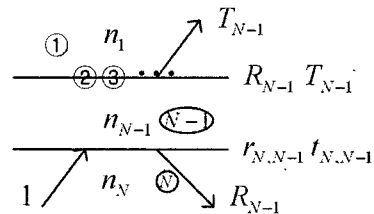


그림 3. Recursive method를 이용한 다층 구조 해석 (slab 1~N-2)  
Fig. 3. Multilayer analysis using recursive method (slab 1~N-2).

$$R_i = \frac{r_{i+1,i} + R_{i-1} e^{+j2\phi_i}}{1 + r_{i+1,i} R_{i-1} e^{+j2\phi_i}} \quad (2a)$$

$$T_i = \frac{t_{i+1,i} T_{i-1} e^{+j\phi_i}}{1 + r_{i+1,i} R_{i-1} e^{+j2\phi_i}} \quad (2b)$$

Radome efficiency는 식 (3)과 같은 식으로 표현된다.  $|T_i|$ 는 레이돔의 삽입 손실을 나타내며, IPD는 삽입 위상 지연을 나타낸다. IPD는 위상이 중요한 배열 안테나의 편파 부정합, BSE(Boresight Error), BSES(Boresight Error Slope)과 같은 계산에 사용된다.

$$T_i = |T_i| \angle IPD \quad (3)$$

본 논문에서는 레이돔의 특성 분석을 레이돔의 투과 효율(RTE: Radome Transmission Efficient)을 이용하여 분석하였으며,  $|T_i|^2$ 로 정의하였다. 수직 편파, 수평 편파에 대해 각각 PER(Perpendicular Polarization), PAR(Parallel Polarization) 약어를 사용하였다.

### 2-3 편파 부정합 해석

편파 부정합은 임의의 편파 특성을 가지는 파가 레이돔을 거치면서 편파의 변형이 생기는 현상을 말한다. 식 (4)는 편파의 기본 단위 벡터를 나타낸 것이며, x 벡터는 수평 편파 부분이 되며, y 벡터는 수직 편파 부분이 된다. 식 (4)에서  $\delta=0^\circ$ 이면 선형 편파,  $\gamma=45^\circ$ 이고  $\delta=+90^\circ$ (LHCP) 또는  $\delta=-90^\circ$ (RHCP)이면 원형 편파이다. 언급한 이외의 각은 타원 편파를 나타낸다. 따라서 각각의 각도의 값을 알면 Poincare sphere를 이용하여 레이돔에 의한 편파의 변화를 알 수 있다. 식 (5)를 이용하여 편파 각도를 구할 수 있으며, 여기서 윗첨자  $i$ 는 입사를 나타내고,  $t$ 는 투과를 나타낸다.

$$\vec{e} = \cos \gamma \vec{x} + \sin \gamma e^{j\delta} \vec{y} \quad (4)$$

식 (5a)는 수직 편파와 수평 편파가 이루는 각도를 나타내며, 투과 후의  $\gamma$ 의 각도를 구할 수 있으며, 식 (5b)는 투과된 후의  $\delta$ 의 각도를 구할 수 있다. 즉, 원형 편파(LHCP:  $\gamma=45^\circ$ ,  $\delta=+90^\circ$ )가 레이돔에 입사하면 투과된 후의 편파 변화는  $\gamma$ 와  $\delta$ 의 변화로 알 수 있다. 식 (5c)와 식 (5d)로부터  $\gamma$ 와  $\delta$ 를 이용하여 Poincare sphere의 경도( $\epsilon$ )와 위도( $\tau$ ) 값을 구

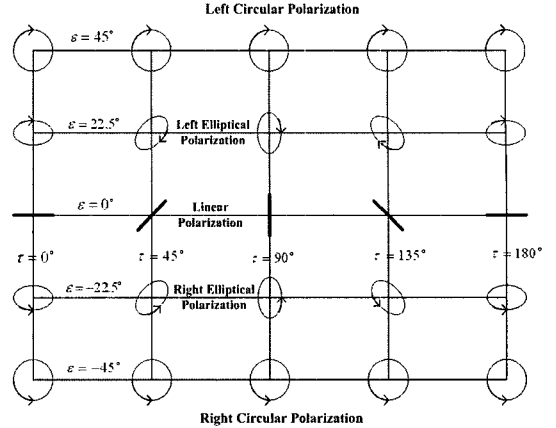


그림 4. Poincare sphere 평면에 투영한 wave의 편파 상태(Source: J. D. Kraus, Electromagnetic, 1984, McGraw-Hill Book Co.)

Fig. 4. Polarization states of electromagnetic waves on planar surface projection of a Poincare sphere (Source: J. D. Kraus, Electromagnetic, 1984, McGraw-Hill Book Co.)

할 수 있다.

$$\begin{aligned} \gamma^t &= \tan^{-1} \left( \frac{|E'_{\perp}|}{|E'_{PVER}|} \right) = \tan^{-1} \left( \frac{|T'_{\perp}| |E_{\perp}^0|}{|T'_{PVER}| |E_{PVER}^0|} \right) \\ &= \tan^{-1} \left( \frac{|T'_{\perp}|}{|T'_{PVER}|} \tan \gamma^i \right) \end{aligned} \quad (5a)$$

$$\delta^t = \phi'_{\perp} - \phi'_{PVER} = \delta^i + \xi'_{\perp} - \xi'_{PVER} = \delta^i + \Delta IPD \quad (5b)$$

$$\sin(2\epsilon^t) = \sin(2\gamma^t) \sin(\delta^t) \quad (5c)$$

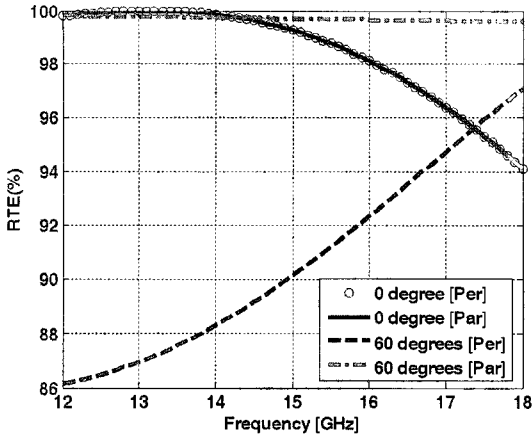
$$\tan(2\tau^t) = \tan(2\tau^i) \cos(\delta^t) \quad (5d)$$

계산된 경도(가로축)와 위도(세로축)로부터 그림 4에 투과 후 전파를 표시할 수 있으며, 편파의 변화의 정도를 예측할 수 있다.

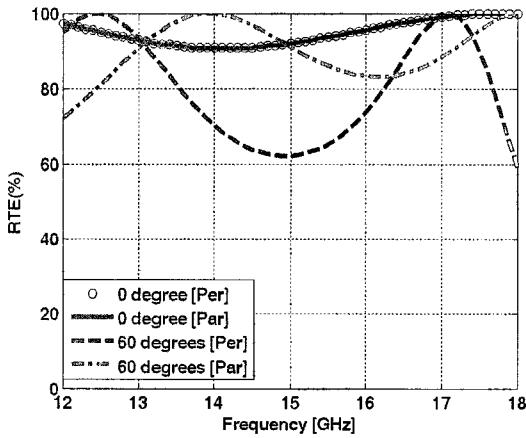
## III. 레이돔 특성 분석

### 3-1 삽입 손실 및 삽입 위상 지연

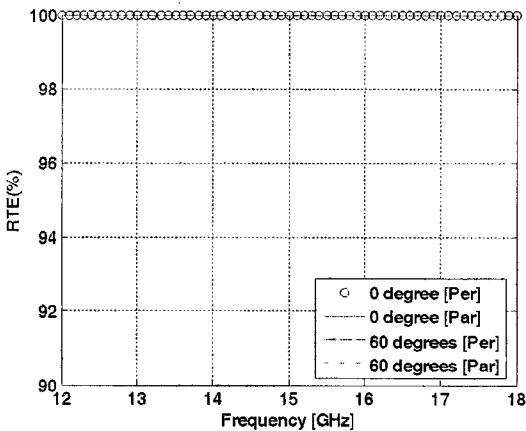
레이돔 1, 2, 3의 삽입 손실과 삽입 위상 지연을 Ku band에서 비교분석하였다. 그림 5에 레이돔 1, 2, 3의 삽입 손실을 나타내었다. 그림 5(a)는 레이돔 1에서 파의 수직 입사와 60도의 경사 입사에 대한 삽입 손실을 나타내었다. 수직 편파 60도 입사에서는 wave가 85%, 수직 입사와 수평 편파 60도 입사에서



(a) 레이돔 1  
(a) Radome 1



(b) 레이돔 2  
(b) Radome 2



(c) 레이돔 3  
(c) Radome 3

그림 5. 레이돔의 삽입 손실  
Fig. 5. Insertion loss of radome.

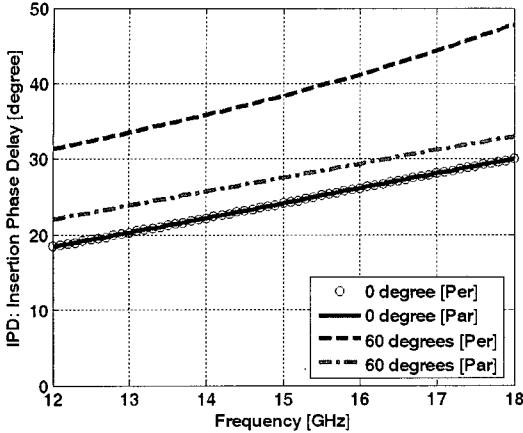
는 wave가 약 95 % 이상 투과되는 것을 확인할 수 있다. 그림 5(b)는 Ku band에서 수직 입사일 때 90 %, 30도 경사 입사일 경우 80 %, 60도 경사 입사일 경우 60 %가 됨을 알 수 있다. 즉, 경사 입사의 각도가 클수록 전달되는 wave의 양이 작게 됨을 알 수 있다. 그러나 17 GHz의 대역에서는 유전체 레이돔에 비해 우수한 삽입 특성을 갖는 것을 확인할 수 있다.

그림 5(c)는 레이돔 3의 삽입 손실을 나타낸 것으로 수직 입사, 경사 입사에 관계없이 파가 100 % 투과됨을 알 수 있다. 이는 앞 절에 기술한 바와 같이 스킨의 굴절 지수와 코어의 굴절 지수가 같게 되면 파가 수직 입사거나 경사 입사에 관계없이 스킨과 코어의 경계면의 반사 계수가 0이 되기 때문이다.

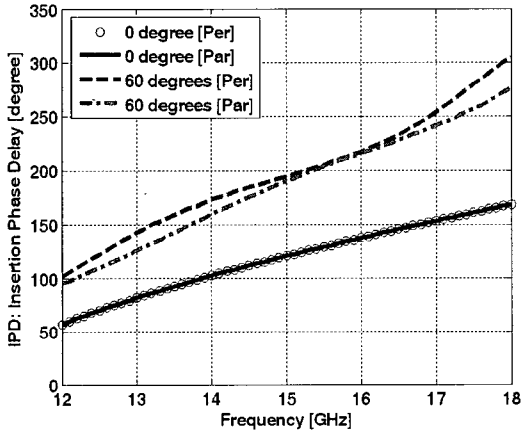
그림 6에는 각 레이돔의 삽입 위상 지연을 나타낸 것이다. 그림 6(a)는 레이돔 1의 수직 입사, 경사 입사 60도에 대한 각각의 삽입 위상 지연을 나타낸 것이며, 주파수가 증가할수록 위상 지연이 커짐을 알 수 있다. 수직 입사일 경우, 레이돔 1에 의한 위상 지연은 최소 18°에서 최대 31°까지 생기는 것을 알 수 있다. 경사 입사의 경우, 수직 편파 60도에서 가장 큰 위상 지연이 발생함을 알 수 있다. 그림 6(b)는 레이돔 2의 수직 입사와 경사 입사에 대한 삽입 위상 지연을 나타낸 것이다. 레이돔 1과 3에 비해 위상 지연의 값이 큼을 알 수 있다. 이것은 두루드 모델의 굴절 지수 값이 주파수가 커질수록 작아지기 때문에 스킨의 위상항이 점점 커지기 때문에 삽입 위상 지연의 값이 커지게 된다. 그림 6(c)는 레이돔 3의 위상 특성을 나타낸 것이며, 위상 지연의 값이 모두 0도임을 알 수 있다. 이는 스킨의 두께와 코어의 두께를 같게 하면 위상항이 상쇄되기 때문이다. 그림에서 알 수 있듯이 이상적인 메타 물질을 이용한 레이돔 3의 특성이 레이돔 1과 2에 비해 매우 우수하고 이상적인 결과를 나타내고 있으며, 주파수와 입사각도에 따른 영향도 발생하지 않음을 알 수 있다. 또한 레이돔 2의 결과를 통해 알 수 있는 것은 물질 상수가 주파수에 따라 일정하면 레이돔의 특성이 크게 변하지 않음을 알 수 있다. 따라서 분산 메타 물질을 레이돔에 적용할 때 가능하면 물질 상수 변화가 작은 주파수 대역을 사용해야 한다.

### 3-2 편파 부정합

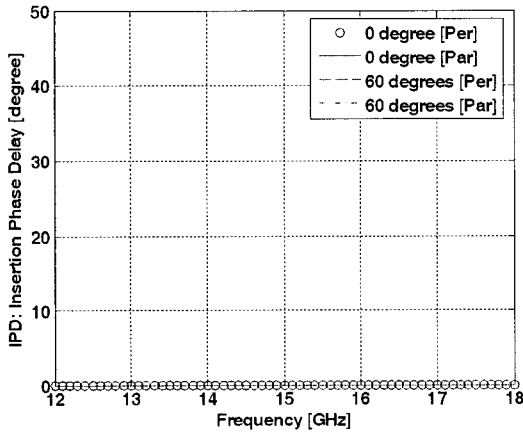
그림 7(a)~(c)는 원형 편파 wave가 각각 수직 입



(a) 레이돔 1  
(a) Radome 1

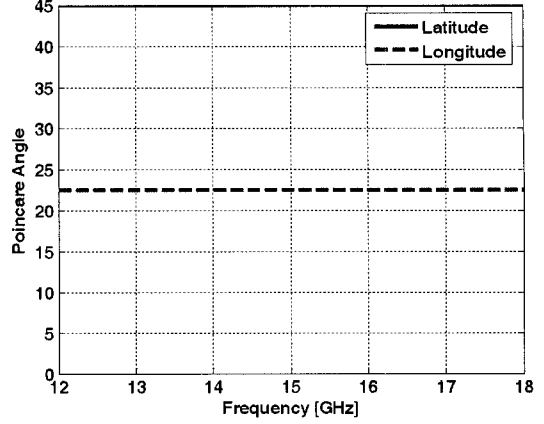


(b) 레이돔 2  
(b) Radome 2

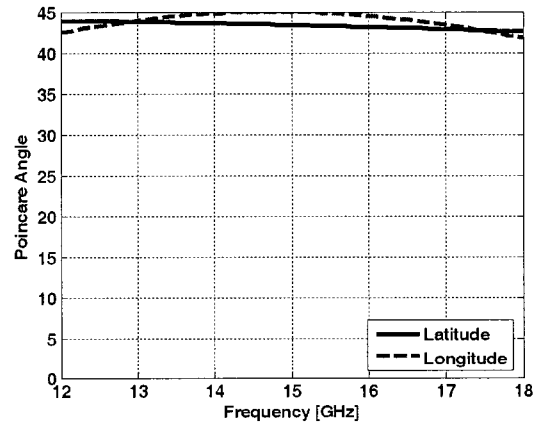


(c) 레이돔 3  
(c) Radome 3

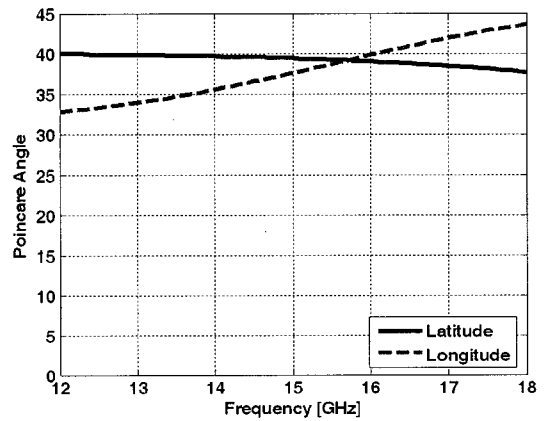
그림 6. 레이돔의 삽입 위상 지연  
Fig. 6. Insertion phase delay of radome.



(a) 수직 입사  
(a) Normal incidence



(b) 30도 경사 입사  
(b) Incidence angle(30 degrees)



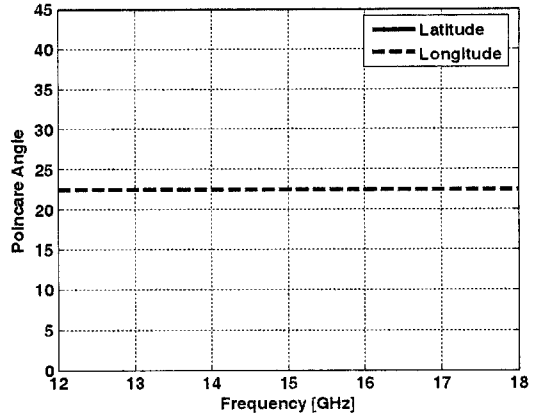
(c) 60도 경사 입사  
(c) Incidence angle(60 degrees)

그림 7. 전파 입사각에 따른 레이돔 1에 대한 poin-care angle

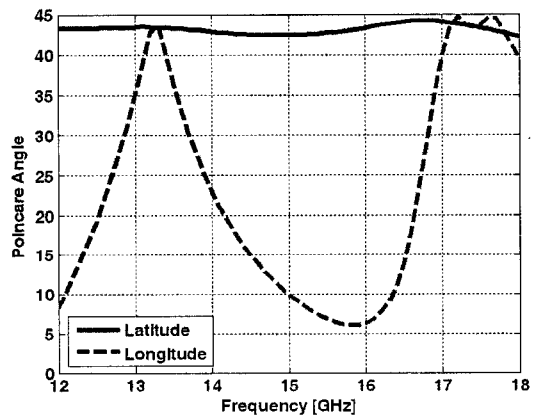
Fig. 7. Poincare angle of radome 1 for wave incidence angle.

사, 30도, 60도로 레이돔 1에 입사되어 투과된 후의 편파 특성을 나타내는 poicare angle을 나타낸 것이다. 그림에서 알 수 있듯이 주파수에 따라 wave의 입사각이 커질수록 poicare angle의 값이 변하게 됨을 알 수 있다. 즉, 입사각이 커질수록 위도 값이 점점 작아지는 것을 알 수 있으며, 이것은 원형 편파에서 타원 편파로 변형되는 정도를 알 수 있는 척도가 된다. 그림 8은 원형 편파 wave가 레이돔 2에 입사되어 투과된 후의 편파 특성 각도를 나타내는 poicare angle을 나타낸 것이다. 수직 입사의 경우, 입사한 원형 편파와 동일하게 투과된 후에도 원형 편파임을 알 수 있다. 하지만 30도 입사 60도의 입사인 경우 입사각도가 커질수록 위도 값이 점점 낮아지는 것을 알 수 있으며, 경도 값은 주파수에 따라 크게 변함을 알 수 있다. 이것은 주파수에 따라 수직 편파 또는 수평 편파의 강한 정도가 달라지기 때문에 장축과 단축이 주파수에 따라 계속 변화됨을 알 수 있다. 위도 값이 낮아지는 것은 원형 편파의 찌그러짐이 심화됨을 알 수 있다. 그림 9는 원형 편파 wave가 입사각을 가지고 레이돔 3에 입사되어 투과된 후의 편파의 poicare angle을 나타낸 것이다. 그림 9에서 알 수 있듯이 입사각에 상관없이 모두 위도 45도, 경도 22.5도인 값을 갖는 것을 알 수 있다. 이것은 입사되는 원형 편파가 레이돔에 투과되어 통과된 후에도 원형 편파로 유지되는 것을 의미한다.

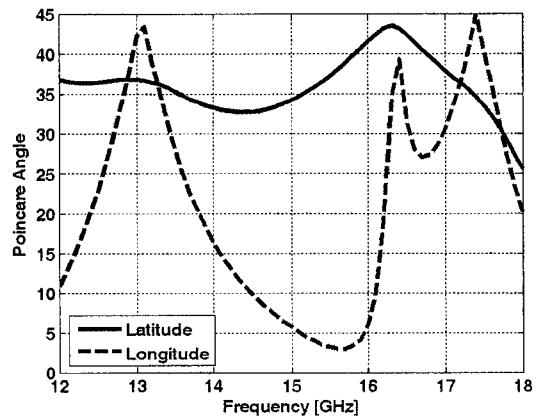
그림 7~9로부터 레이돔 1과 2는 입사 각도가 커질수록 위도 값이 작아지고 타원 편파에 가까워지는데 반해 레이돔 3의 경우, 위도와 경도 값이 일정함을 알 수 있다. 이것은 편파 특성을 갖는 입사파에 대해 투과파 역시 동일한 편파 특성을 유지되는 것을 의미한다. 그림 7~9의 결과를 앞서 그림 4에서 나타난 poicare 각을 이용하여 그림 10에 나타내었다. 표시된 편파의 주파수는 15 GHz에서의 편파 특성을 나타낸 것이다. 입사파는 LHCP이기 때문에 맨 위에 존재하게 되며, 좌표 각은  $\epsilon=45^\circ$ ,  $\tau=0^\circ$ 이기 때문에 좌측 위의 꼭지점에 존재하게 됨을 알 수 있다. 그림 10(a)는 레이돔 1로 인한 편파 변화를 나타낸 것으로 파의 입사각이 커질수록 투과되어 나오는 wave의 편파가 타원 편파로 변형되어 나옴을 알 수 있다. 그림 10(b)는 15 GHz에서 경도 값은 작지만 위도 값이 입사각에 따라 커짐을 알 수 있다. 3개의 레이돔 중



(a) 수직 입사  
(a) Normal incidence



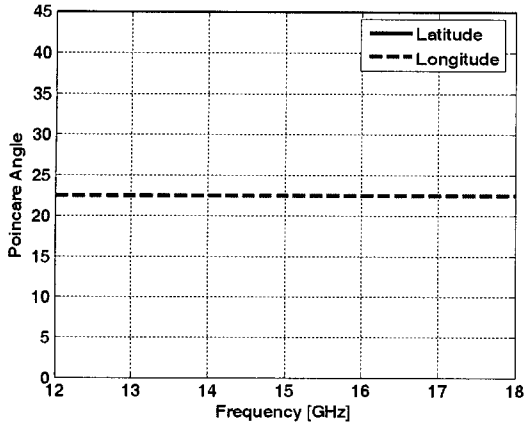
(b) 30도 경사 입사  
(b) Incidence angle(30 degrees)



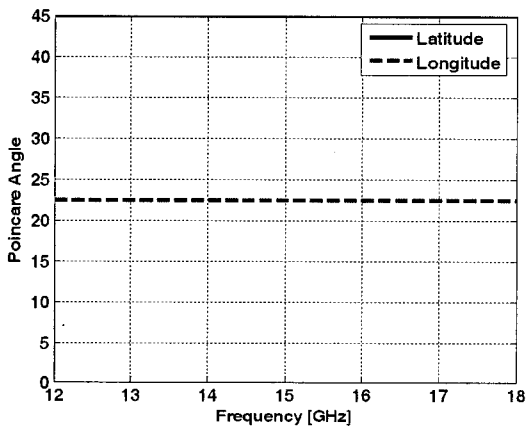
(c) 60도 경사 입사  
(c) Incidence angle(60 degrees)

그림 8. 전파 입사각에 따른 레이돔 2에 대한 poicare angle

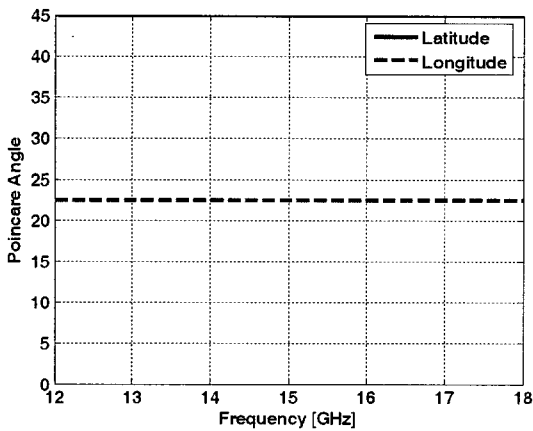
Fig. 8. Poincare angle of radome 2 for wave incidence angle.



(a) 수직 입사  
(a) Normal incidence

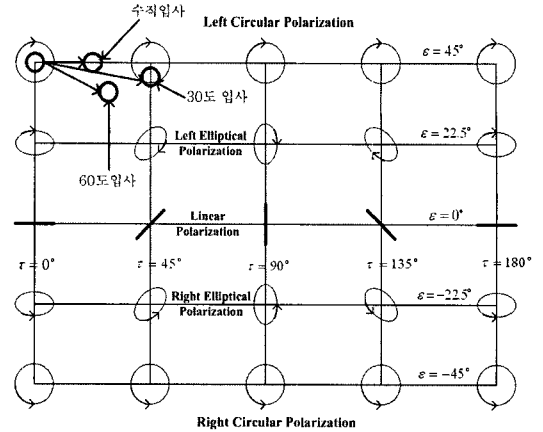


(b) 30도 경사 입사  
(b) Incidence angle(30 degrees)

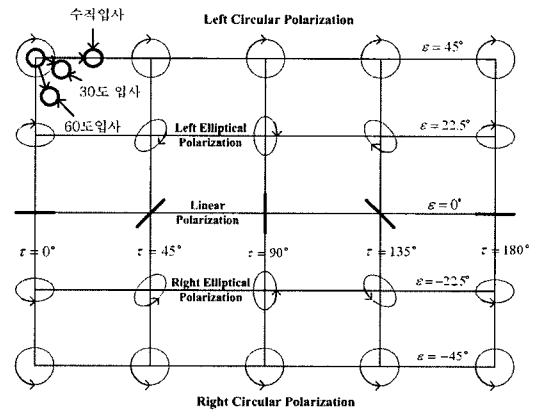


(c) 60도 경사 입사  
(c) Incidence angle(60 degrees)

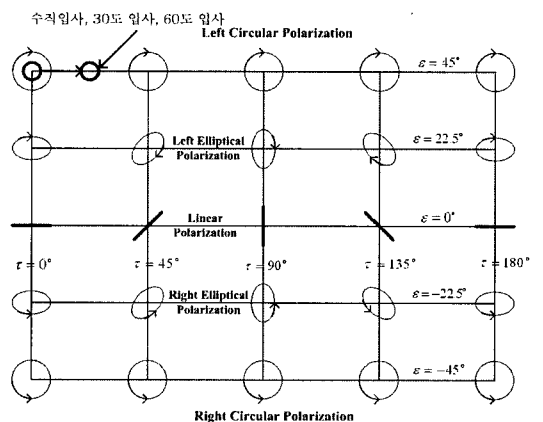
그림 9. 전파 입사각에 따른 레이돔 3에 대한 poincare angle  
Fig. 9. Poincare angle of radome 3 for wave incidence angle.



(a) 레이돔 1  
(a) Radome 1



(b) 레이돔 2  
(b) Radome 2



(c) 레이돔 3  
(c) Radome 3

그림 10. Poincare 평면을 이용한 각 레이돔에 대한 편파 특성 변화  
Fig. 10. Polarization variation of each radome using poincare surface.



입사각이 커질수록 주파수 분산 특성을 갖는 메타 물질을 갖는 레이돔의 특성이 좋지 않음을 알 수 있다. 그림 10(c)는 radome 3에 의한 편파 변화를 나타낸 것으로 그림 10(a), (b)와는 달리 입사각에 대한 영향을 받지 않으며, 입사 편파인 원형 편파가 투과된 뒤에도 원형 편파 그대로 유지됨을 알 수 있다. 따라서 이상적인 메타 물질을 이용한 레이돔이 유전체를 이용한 레이돔에 비해 편파 부정합 특성이 우수함을 알 수 있다.

#### IV. 결 론

본 논문에서는 A-Sandwich 레이돔의 코어 물질로 분산 메타 물질과 이상적인 메타 물질을 적용함으로써 기존 레이돔의 성능과 비교 분석하였다. 또한 메타 물질을 사용하여 레이돔의 우수한 성능을 얻기 위한 메타 물질 레이돔 적용 조건을 제안하였다. 각 레이돔 특성은 recursive method 방법을 이용하여 해석하였으며, 레이돔의 주요 성능 파라미터인 삽입 손실, 삽입 위상 지연, 편파 부정합을 비교 분석하였다. 분산 메타 물질을 적용한 레이돔은 유전체 레이돔 구조와 같게 하였으며, 이상적인 메타 물질을 이용한 레이돔은 스킨의 굴절 지수와 코어의 굴절 지수의 절대값이 같고 전체 스킨의 두께와 코어의 두께를 동일하다고 가정하였다. 유전체로 구성된 레이돔과 분산 메타 물질을 적용한 경우, 삽입 손실과 삽입 위상 지연이 존재하기 때문에 편파 부정합이 발생되며, 이로 인하여 레이돔의 좋은 성능을 얻는데 한계가 있는 반면에 이상적인 메타 물질을 코어로 갖는 A-Sandwich 레이돔의 경우, 제안된 조건을 만족하면 삽입 손실과 삽입 위상 지연이 발생하지 않기 때문에 편파 부정합이 발생하지 않아 입사하는 고유 편파 특성을 유지할 수 있다. 즉, 주파수에 일정한 값을 갖는 메타 물질을 적용하고 본 논문에서 제안된 적용 조건을 레이돔에 적용하거나 분산 메타 물질일 경우 주파수에 따른 물질 상수 변화가 작은 주파수 대역을 선택하여 레이돔에 적용함으로써 유전체로 구성된 레이돔보다 이상적이며 우수한 전파 특성을 얻을 수 있다. 따라서 본 논문은 레이돔에 실제로 적용할 수 있는 메타 물질의 개발 연구와 함께 메타 물질을 활용한 다양한 연구로부터 개선된 전파

특성을 갖는 레이돔 설계 및 개발에 활용할 수 있다.

#### 참 고 문 헌

- [1] V. G. Veselago, "Electrodynamics of substances with simultaneously negative electrical and magnetic permeabilities", *Soviet Physics Uspekbi*, vol. 10, no. 4, pp. 5-13, Jan.- Feb. 1968.
- [2] J. B. Pendry, A. J. Holden, W. J. Stewart, and I. Youngs, "Extremely low frequency plasmons in metallic mesostructures", *Physical Review Letters*, vol. 76, no. 25, pp. 4773-4776, Jun. 1996.
- [3] J. B. Pendry, A. J. Holden, D. J. Robbins, and W. J. Stewart, "Magnetism from conductors and enhanced linear media", *IEEE Trans. Microwave Theory Tech.*, vol. 47, no. 11, pp. 2075-2084, Nov. 1999.
- [4] R. A. Shelby, D. R. Smith, and S. Schultz, "Experimental verifications of a negative index of refraction", *Science*, vol. 292, pp. 77-79, Apr. 2001.
- [5] N. Engheta, R. W. Ziolkowski, *Metamaterials: Physics and Engineering Exploration*, IEEE, 2006.
- [6] J. B. Pendry, "Negative refraction makes a perfect lens", *Physical Review Letters*, vol. 85, pp. 3966-3969, 2000.
- [7] S. A. Ramakrishna, J. B. Pendry, D. Schurig, D. R. Smith, and S. Schultz, "The asymmetric lossy near-perfect lens", *Journal of Modern Opt.*, vol. 49, pp. 1747-1762, 2002.
- [8] Y. Zhang, T. M. Grzegorzczak, and J. A. Kong, "Propagation of electromagnetic waves in a slab with negative permittivity and negative permeability", *Progress in Electromagnetic Research PIER*, vol. 35, pp. 271-286, 2001.
- [9] J. A. Kong, "Electromagnetic wave interaction with stratified negative isotropic media", *Progress in Electromagnetic Research PIER*, vol. 35, pp. 1-52, 2002.
- [10] H. Cory, C. Zach, "Wave propagation in metamaterial multi-layered structures", *Microwave and Optical Letters*, vol. 40, no. 6, Mar. 2004.
- [11] N. Garcia, M. Nieto-Vesperinas, "Left-handed ma-

terials do not make perfect lens", *Physical Review Letters*, vol. 88, no. 20, pp. 207-403, May 2002.

- [12] L. Shen, S. He, "Studies of imaging characteristics for a slab of a lossy left-handed material", *Physics Letter A*, pp. 298-305, 2003.
- [13] Dennis J. Kozakoff, *Analysis of Radome-Enclosed Antennas*, Artech House, 1997.
- [14] 이경원, 홍익표, 정영철, 육종관, " Drude 모형

특성을 갖는 메타 물질의 임계각에 관한 연구", 한국전자과학회논문지, 19(9), pp. 1020-1027, 2008년 9월.

- [15] 이경원, 홍익표, 정영철, 육종관, "손실 특성의 메타 물질이 포함된 다층 구조 slab의 특성 분석", 한국전자과학회논문지, 19(12), pp. 1384-1393, 2008년 12월.

### 이 경 원



2003년 2월: 대전대학교 전자공학과 (공학사)  
 2005년 2월: 연세대학교 전기전자공학과 (공학석사)  
 2005년 9월~현재: 연세대학교 전기전자공학과 박사과정  
 [주 관심분야] EMI/EMC, 마이크로파 해석

### 정 영 철



1993년 4월~현재: 국방품질관리소 선임연구원  
 2001년: 연세대학교 전자공학과 (공학석사)  
 2002년 3월~현재: 연세대학교 전자공학과 박사과정  
 [주 관심분야] EMI/EMC, 마이크로파 수치해석

### 홍 익 표



1994년 2월: 연세대학교 전자공학과 (공학사)  
 1996년 2월: 연세대학교 전자공학과 (공학석사)  
 2000년 2월: 연세대학교 전기컴퓨터공학과 (공학박사)  
 2000년 3월~2003년 2월: 삼성전자 정보통신총괄 책임연구원  
 2006년 2월~2007년 2월: Texas A&M University, Visiting Scholar  
 2003년 3월~현재: 공주대학교 정보통신공학부 부교수  
 [주 관심분야] 전자기 수치해석, 스펙트럼 관리, 이동 통신

### 육 종 관



1987년 2월: 연세대학교 전자공학과 (공학사)  
 1989년 2월: 연세대학교 전자공학과 (공학석사)  
 1998년 2월: University of Michigan 전기전자공학과 (공학박사)  
 1997년 1월~1998년 10월: University of Michigan Research Fellow  
 1998년 11월~1999년 2월: Senior Engineer, Qualcomm Inc.  
 1999년 3월~2000년 2월: 광주과학기술원 조교수  
 2000년 3월~현재: 연세대학교 전기전자공학과 교수  
 [주 관심분야] 마이크로파 구조 해석 및 설계, RF MEMS, 박막공진 구조

### 박 범 준



1994년 2월: 충남대학교 전자공학과 (공학사)  
 2000년 2월: 충남대학교 전파공학과 (공학석사)  
 2001년 1월~현재: 국방과학연구소 연구원  
 [주 관심분야] 수동소자 설계, 초고주파 수신기 설계