레이돔 제조 공정과정에서 유전율에 미치는 영향 인자에 대한 연구

강신민* · 금종주** · 강춘호* · 이승재* · 변기식***

A Study on the Factors to Influence Permittivity in the Radome Manufacturing Process

Kang Shin-Min* · Keum Jong-Ju** · Kang Chun-Ho* · Lee Seung-Jae* · Byun Gi-Sig***

요 약

비선형 곡선 형상의 레이돔은 안테나 보호를 위해 적당한 기계적 강도와 RF(Radio Frequency)적으로 전기적 성능 저하가 최소화 될 수 있도록 설계 되어져야 한다. 특히 전기적 성능은 원소재가 가지는 유전율에 따라 좌우되는 중요 요소로서 제조 과정에서 관리하여야 하는 중요한 인자중 하나이다. 본 연구에서는 레이돔 제조 공정 중에서 유전율에 영향을 미치는 주요 인자를 실험을 통하여 밝혀내고, Simulation을 통하여 유전율이 레이돔의 전기적 성능에 미치는 영향을 파악한다.

ABSTRACT

A nonlinear curve shaped radome should be designed in a way that the deterioration of electrical performance in terms of mechanical strength and radio frequency(RF) can be minimized to protect the antenna. Electrical performance, in particular, is a critical factor that depends on the permittivity of the original materials and thus should be monitored during the manufacturing process along with other factors. This study set out to identify major factors that would affect permittivity during the manufacturing process of a radome through experiments and examine the impacts of permittivity on a radome's electrical performance through simulations.

키워드

Radome, RF, Fiberglass

Ⅰ. 서 론

레이돔은 지상, 함정, 비행기, 미사일 등의 레이더 용 안테나를 습기, 비, 우박, 먼지 및 속도에 의한 공기저항 등의 환경적인 요소들로부터 보호하는 역할과, 레이더 신호의 송신 및 수신이 레이돔을 통해서 투명하게 이루어지게 하는 전자기파 창문 역할을 수행하는 구조물이다. 따라서 레이돔은, 고도, 속도, 크기 등의 장비 운용환경에 따라 그 모양, 재질 및 설치방법이 달라진다. 레이돔의 장착 구조는 그림 1과 같이 레이돔이 설치된다.

일반적으로 레이더 성능은 안테나의 크기가 클수록 반사전파(反射電波)의 포착력이 우수하고 유효거리도

* LIG넥스원 구미연구소
** 국방기술품질원 유도전자센터
*** 부경대학교 (교신저자)

접수일자 2008. 12. 03

길어지므로 이에 따라 레이돔도 대형화된다. 또, 전파의 투과(透過)를 좋게 하기 위해서는 레이돔의 재질이 전기 절연체이면서 전체적으로 이음매가 없는 일체(一體)의 것이어야 하며 그 모양도 안테나의 회전각도가 변하는 데 대해서 내부반사가 적은 것이어야 하고, 최초의 목적인 안테나의 커버를 위해 강한 풍압에 견딜 수 있는 강도가 있어야 한다[1,2]. 그러나 이것을 항공기나 미사일용 레이더 안테나에 적용시켜 보면 매우 번거로운 문제가 된다.

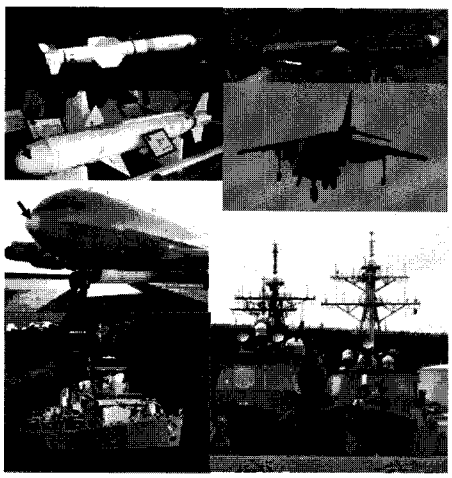


그림 1. 각종 레이돔 적용 예
Fig. 1 Example of various radome applications

즉, 기체의 저항을 가능한 한 감소시키기 위해 모양을 유선형으로 할 필요가 있는데, 이것은 전파의 포착성능을 저하시키는 결과가 된다. 또, 매우 강한 풍압 외에도 공기와의 마찰이나 공력적(空力的)인 가열, 새[鳥]나 우박 등의 충돌에도 견딜 수 있는 강도를 지니고 있어야 하며, 전천후로 사용할 수 있는 내수(耐水) ·내후성(耐候性) 재료로 만들어야 한다. 더구나 중량의 경감이나 설치장소 제한 등의 조건이 첨가되므로, 재질을 비롯해서 설계에는 많은 노력이 필요하게 된다.

일반적으로 레이돔의 경우 전기적 성능은 적용되는 시스템에 따라 다양하게 적용되고 있지만 일반적으로 투과 손실율(전력 전달률), 보어사이트 오차, 빔 패턴 리플율, Power Handling 등으로 평가하게 된다. 투과 손실율은 레이돔의 존재 여부에 따른 안테나로부터 방사되는 전력의 손실양이 얼마만큼 발생하는지의 정도를 평가하는 항목이며, 보어사이트 오차는 미사일과 같은 모노펄스레이더에 적용되는 레이돔의 경우 레이돔으로 인한 안테나 방사패턴의 오차가 얼마만큼 발생하는 정도를 측정하는 항목으로 투과손실율과 보어사이트 오차가 적을 수 록 안테나 탐지거리 및 탐지정확도를 높일 수가 있다.

앞에서 설명한 레이돔의 전기적 성능에 영향을 주는 인자로는 내/외부 곡면 기울기, 두께 등의 형상 설계치, 재료의 물성치(유전율 등) 그리고 제조 공정상 변수 등에 따라 차이가 크게 발생하게 되는데[1,4], 특히 그림 2에서와 같이 유전율 변화에 따라 레이돔에 의한 방사 전계강도를 도시화하여 보면 유전율이 높을수록 레이돔에 의한 손실이 증가하며, 방사 패턴이 일그러짐을 확인할 수 있다.

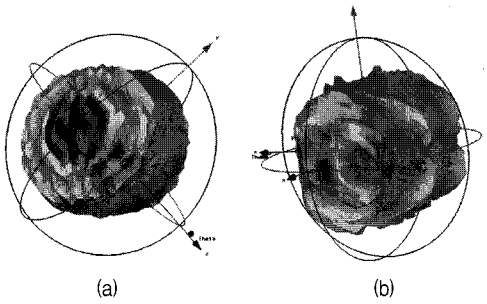


그림 2. 유전율 변화에 따른 방사패턴
(a) 유전율 4.8 (b) 유전율 5.0
Fig. 2 Radiation patterns in the different permittivity
(a) permitivity 4.8 (b)permitivity 5.0

레이돔 주요 소재(원재료) 유전율에 대한 측정 사례는 있으나 레이돔 제조 공정별 유전율 변화 분석 사례는 매우 드물다. 본 연구에서는 레이돔의 전기적 성능에 영향을 주는 재료의 유전율이 제조 공정 중 어떠한 제조 인자에 따라 변화하는지 관심을 두어 연구를 한다.

Ⅱ. 레이돔 공정에서의 유전율 영향인자 분석

2.1 유전율

보통 물질의 유전율(또는 유전상수)은 전하가 물질 내에 놓여 있을 때 생성하는 전기장의 세기로 정의 한다. 그러나 물질이 도체가 아니라 부도체인 경우 전하는 물질의 분자를 벗어나지 못하고 전하에 의해 분포가 쏠리

게 됨으로써 분자 자체를 임시로 극성분자를 만든다. 이렇게 임시로 만들어진 극성분자의 전하분포는 전기장의 세기에 영향을 주기 때문에 전기장의 세기가 유전상수 만큼 달라진다. 표 1은 대표적인 재질의 유전율 상수를 나타낸다. 이러한 유전율은 물질 고유의 특성치 이며 전기장 세기에 연관된 요소로, 레이돔과 같이 전파 투과와 연계된 제품 설계 시에 가장 크게 고려해야 할 사항 중 하나이다. 그러므로 레이돔 제조 공정 중 유전율 변화 인자가 있다면 변화 요소를 최소화 할 필요성이 있다.

표 1. 주요 재질별 유전율 상수
Table. 1 Permittivity in the different material

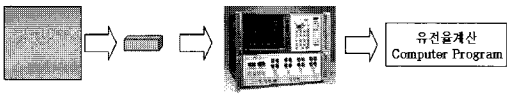
재질명	측정 온도	측정 주파수		
		300 Mhz	3 Ghz	10 Ghz
FR4			4.6 0.0004	
Silicon				11.9 0.0476
Teflon		2.1 0.0003	2.1 0.0003	2.08 0.0008
Polyethylene (pure)	24		2.25 0.0007	2.25 0.0009
Ceramic			5.6 0.02296	
Quartz, fused	25		3.78 0.00023	3.78 0.0004
Rubber, pale crepe	25		2.15 0.0065	
Nylon 66	25		3.03 0.039	
Bakelite (no filler)	24		3.64 0.19	3.52 0.13
Fiberglass BK 174(laminated)	24	4.54 0.1	4.4 0.13	4.37 0.16
Alumina (99.5%)				9.5 0.00285
Titiana (D-100)				96 0.096

* 위쪽은 비유전율의 실수부(Dielectric constant), 아래쪽에 있는 것은 비유전율의 허수부이다.

본 연구에서는 기계적인 강도와 무게의 장점 등으로 미루어 항공용에 많이 응용(항공기 동체, 레이더 반사판, 레이돔 등)되고 있는 복합소재(Fiber-Glass)에 특정하여 다루기로 한다.

2.2 유전율 측정 방법

레이돔 형상이 비선형 곡선의 경우 직접적으로 유전율을 측정하기가 매우 어렵기 때문에 그림 3과 같이 평면형태의 시편으로 제작하여 Network Analyzer를 이용하여 측정된 S-Parameter로 부터 구한 데이터를 해석적 알고리즘에 대입하여 재질의 유전율을 측정하게 되며 [5,6], 이러한 측정방법을 통하여 유전율을 측정하면 레이돔 제조 과정에서 유전율에 변화를 주는 주요 변화 인자를 파악하고 관리할 수 있다.



<레이돔 재질 시편> <W/G용 시편 가공> <Network Analyzer분석> <유전율 측정>

그림 3. 유전율 측정 절차
Fig. 3 Permittivity Measurement Process

레이돔 재질 시편에 대한 유전율 측정을 위한 알고리즘은 다음과 같이 유도한다. 그림4와 같이 waveguide 모델링에 대하여 Lossy Rectangular Waveguide의 일반해를 이용한다. 여기서 Region II는 유전율 측정을 위한 레이돔 시편이다. Rectangular Waveguide 모델링에 TE10 모드가 인가되었을 때 일반해는 아래 식과 같이 표현 가능하다[3].

$$H_z = \cos\frac{\pi x}{a}\, e^{-\gamma z} \tag{1}$$

$$E_y = \frac{-j\omega\mu\pi}{a(k^2+\gamma^2)} sin\frac{\pi x}{a}\, e^{-\gamma z} \tag{2}$$

$$H_x = \frac{\gamma\pi}{a(k^2+\gamma^2)} sin\frac{\pi x}{a}\, e^{-\gamma z} \tag{3}$$

이 식에서 k는 자유공간에서 파수이고, γ는 전파상수로서 그림의 시편에 대한 전파상수는

$\gamma^2 = (\frac{\pi}{a})^2 - k^2$ 가 된다. Rectangular Waveguide의 일반해로부터 Region I-II(z=0), II-III(z=d)에서 두 매질에 대한 각각의 경계조건을 적용하여 아래 식과 같이 매질의 유전율을 구하는 식을 유도할 수 있다.

$$\mu = \frac{\gamma}{\chi} = \frac{\gamma_0}{\gamma_1} \cdot \frac{1}{\chi} \tag{4}$$

$$\mu_r = \frac{1}{\mu} = \chi \cdot \frac{\gamma_1}{\gamma_0} \quad (5)$$

$$\gamma_1^2 = (\frac{\pi}{a})^2 - k_0^2 \epsilon_r \mu_r = (\frac{\gamma_0}{\gamma})^2 \quad (6)$$

$$\epsilon_r = \frac{(\frac{\pi}{a})^2 - \gamma_1^2}{k_0^2 \mu_r} \quad (7)$$

μ: 매질의 투자율
γ: 전파속도
χ: 매질의 자화율
γ_0: waveguid 내부에서 시편이 없는 영역에 대한 전파속도
γ_1: 측정 시편 내부 전파상수
μ_0: 자유공간의 투자율
μ_r: 비투자율
k_0 : 시편이 없는 공간에서의 wave number
ϵ_r : 비유전율
a : 시편의 폭

그러므로 Network Analyzer을 이용하여 측정되는 시편에 대한 반사계수로부터 전파상수를 구하여 식 (7)로부터 유전율을 구하게 된다.

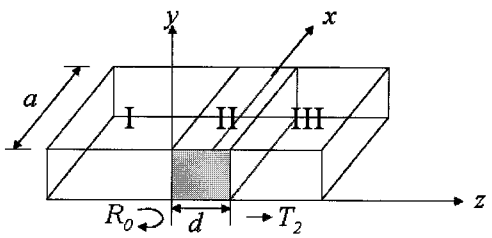


그림 4. Waveguide 모델링
Fig. 4 Waveguide modelling

2.3 레이돔 제조공정

레이돔 제조 공정은 레이돔 재료에 따라 여러 가지로 구분 되는데 본 연구에서는 유리강화 복합섬유(Glass-fiber)를 적층 방식으로 제작되는 공정을 국한하여 공정을 검토하였으며, 각 제조 공정별 유전율에 영향을 주는 공정을 살피고자 한다.

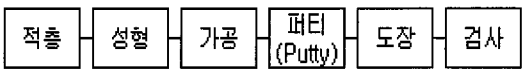


그림 5. 레이돔 제조 공정
Fig. 5 Radome Manufacturing Process

레이돔 제조 공정은 그림 5와 같이 롤로 감긴 유리강화 복합섬유 PREPREG (HG-1581/RS3232)를 레이돔 외부 형상의 틀에 맞게 재단을 한다. 재단을 한 원자재를 준비된 레이돔 형틀에 적층을 하여 고온/고압의 Autoclave 방식의 성형 Chamber에서 레이돔 형상으로 성형을 한다. 성형이 끝난 후 원하는 최종 형상으로 레이돔 가공을 수행하고, 성형 중 고온/고압 환경 하에서 수지의 레진 흐름 차이로 인해 레이돔 외부에는 핀 홀이 존재하게 되는데 이에 대하여 그림 6과 같이 Putty 공정을 통하여 메꿈 작업을 실시하며 메꿈 작업한 곳 이외에 불필요하게 도포된 Putty 재를 제거하여 표면을 매끄럽게 처리한다. Putty 작업이 끝나면 레이돔 표면 처리를 위해 하도 도장, 상도 도장의 순으로 최종 레이돔 제작 공정이 완료된다. 이때 도료 재료는 전기적 성능 변화가 최소화 될 수 있도록 선택하여야 한다. 본 연구에서 사용된 도료는 항공용에 사용되는 보잉사 규격의 도료(BMS10-60, TY II, CL B, GR D)를 사용한다.

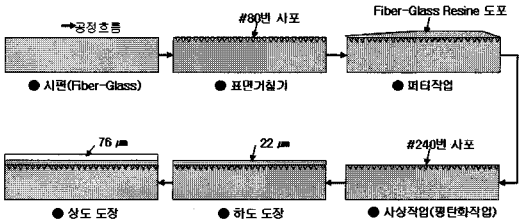
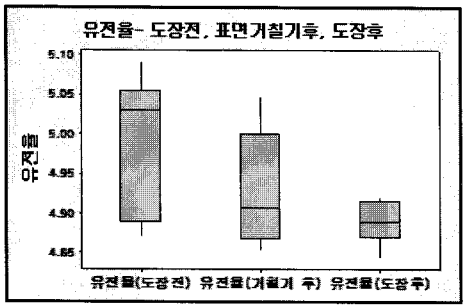


그림 6. 레이돔 퍼티 및 도장 공정
Fig. 6 Putty and Painting Process in the Radome

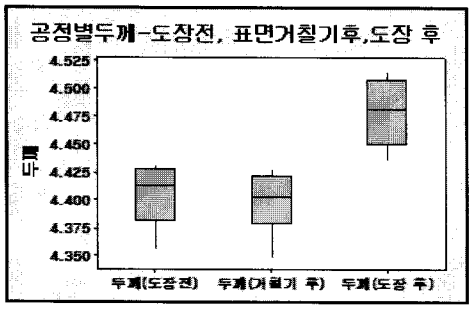
2.4 제조 공정별 유전율 영향인자 분석

레이돔 완성품은 원소재 자체 유전율과 더불어 제조 공정 중 퍼티재, 도장 등의 이종 재질과 제조 방법의 무수한 인자 등이 복합적으로 반영된 유전율로 나타난다. 레이돔 제조 공정별 유전율에 영향을 주는 예비인자를 살펴보면 다음과 같다. 적층 공정에서는 적층 방법, 진공압력, 시간 등이며, 성형공정에서는 성형 틀인 금형의 형상, 가압 압력, 온도 등이며, 퍼티 공정에서는 퍼티재료, 방법, 표면 거칠기 등이며, 가공공정에서는 가공 두께, 표면처리 공정에서는 내면 디핑 재료, 도장 두께 등이다.

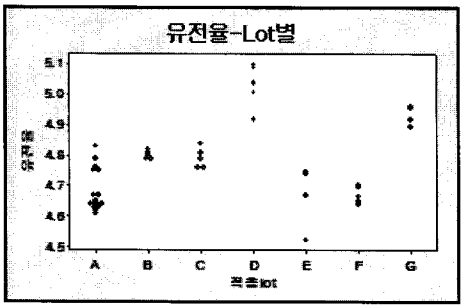
예비 인자 중 유전율 영향성 최종 실험을 위하여 각 인자별(두께, lot, 거칠기, 도장, 퍼티 등)로 시편 130개를 만들어서 Network Analyzer를 이용하여 측정된 데이터와 시편 두께의 경계조건을 이용하여 유전율을 구하였다. 실험 결과 각 공정별 영향 인자에 따라 그림 7과 같은 상관관계를 얻었다.



(1)



(2)



(3)

그림 7. 유전율에 영향을 주는 인자 (1) 공정별 유전율 변화 (2) 공정별 두께 변화 (3) 적층판별 유전율 변화
Fig. 7 Factors to Influence Permittivity
(1) Permitivity variance in the manufacturing process
(2) Thickness variance in the manufacturing process
(3) Permitivity variance by lot

그림 7의 그래프 2)에서는 공정별로 두께의 변화가 보이나 그래프 1)에서 나타나듯이 두께 변화 보다는 상대적으로 표면 거칠기와 도장에 따라 유전율의 변화가 크다. 즉, 표면 거칠기와 도장 후의 유전율은 떨어지는 경향을 보이고 있다. 또한 그래프 3)은 7개의 적층판을 제작하여 각 적층판에서 시편을 제작하여 유전율을 살펴본 결과 적층판 원소재의 두께 차이보다는 적층을 다르게 구분 한 것에 따라 유전율이 차이가 있는 것으로 나타났다. 이는 성형 공정 중 유전율의 차이가 발생함을 알 수 있다. 이외의 영향 인자라고 생각했던 것에 대하여는 특이사항이 없음을 확인하였다.

이와 같은 결과 유전율에 가장 영향을 미치는 2가지 주요 인자를 주요 공정별 연관 지어 볼 때 표면 거칠기는 Putty 공정 중 유전율에 영향을 줄 수 있으며, 적층판별 차이로 볼 때 적층 및 성형 공정 lot가 달라지면 유전율에 영향을 줄 수 있다.

결과적으로 제조 공정 중 유전율의 변화를 최소화하기 위해서는 표면 거칠기, 도장 및 lot 관리가 필요하다는 것을 알 수 있었다. 또한 표면 거칠기는 표면이 매끄러울수록 최초 설계치를 만족할 수 있다.

또한 시편 두께에 대한 차이를 보면 그림 8에서와 같이 두께에 따라 일정한 경향이 없으며 이는 두께가 유전율에 영향을 주지는 않는다는 것을 알 수 있다. 레이돔 표면 평탄화 작업에 사용 되는 퍼티재료(폴리퍼티)와 내부 디핑 재료인 에폭시(AW 106) 재료 적용에 따른 유전율과의 연관성은 그림 9와 같이 data 분포를 볼 때 대체적으로 영향이 없음을 알 수 있다. Dipping을 할 때와 안할 때, 폴리퍼티를 적용한 것과 하지 않았을 경우에 유전율의 차이가 없었다.

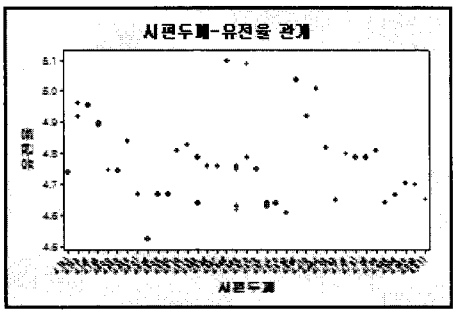


그림 8. 시편두께-유전율 관계
Fig. 8 Relation between sample thickness and permittivity

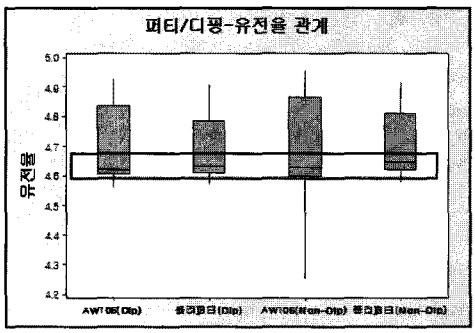


그림 9. 퍼티/디핑-유전율 관계
Fig. 9 Relation between putty/dipping process and permittivity

Ⅲ. 결 론

레이돔 제조 공정 중 원소재 유전율 변화에 가장 영향을 미치는 영향 인자로 표면 거칠기, 도장 및 제조 lot별로 차이가 있음을 확인하였다.

이와 밀접한 세부 공정은 Putty 공정과 적층/성형 공정으로 레이돔 설계시 원소재 물성치 변동을 최소화 하기 위해서는 상기 2개 제조 공정을 관리해야 함을 알 수 있었다.

참고문헌

[1] J.D. Walton, Jr., "Radome Engineering Handbook," Marcel Dekker, Inc., 1970

[2] David K. Barton, Sergey A. Leonov "Radar Technology Encyclopedia" p385 Artech House

[3] David M. Pozar, "Microwave Engineering Secon Edition" WILEY, 2000

[4] 박창현, 박천석, "표면적분 기법을 이용한 미사일 레이돔 해석," 춘계 마이크로파 및 전파학술대회 논문집, vol.21, no.1, 1997

[5] 오이석, "동축선 끝단을 이용한 유전율 측정시스템 개발" 한국과학기술정보연구원 p43, 1999년

[6] 황재호, "고주파대역 유전율 측정법 분석", 정보전자기술논총,2005, 제4호. pp 209-226

저자소개

강신민(Shin-Min Kang)

인하대학교 기계공학과 학사
현)LIG넥스원 구미연구소
선임연구원

관심분야:Multi-body Phsics, 구동제어, RF부품 설계

금종주(Jeong-Ju Keum)

1991 단국대학교 전자공학 석사
2009 단국대학교 전자공학과 박사 과정
현) 국방기술품질원 유도전자센터 선임연구원

※ 관심분야: Computer Engineering, Immage Processing, 전자 제어

강춘호(Kang Chun-Ho)

숭실대학교 전자공학 석사
현) LIG넥스원 구미연구소
선임연구원

※관심분야 : 안테나 및 RF 회로 설계

이승재(Lee Seung-Jae)

경북대학교 응용화학과 학사
현) LIG넥스원 구미연구소
주임연구원

※관심분야 : 복합재료, 고분자재료,전도성재료

변기식(Gi-Sig Byun)

1990년 Wichita State University 전기공학과 공학박사
1990년~현재 부경대학교 전기제어공학부 정교수

※관심분야 :디지털제어, 비선형제어, 신호처리, 전력선통신, 전력선 진동해석