

EMI/EMC 대책용 광대역화 전파흡수체의 개발에 관한 연구

전 상 업* · 김 동 일**

A Study on Development of Broad-band Electromagnetic Wave Absorber for EMI/EMC

Sang-Yup Jun · Dong-Il Kim

〈 목 차 〉

Abstract

1. 서 론

2. EMI/EMC

2.1 EMI/EMC의 개념

2.2 전자파장해의 사례

2.3 전자파장해의 방지대책

3. 전파흡수체

3.1 전파흡수체의 종류

3.2 전파흡수체 이론

3.3 페라이트투자율의 주파수분산특성

4. 광대역화 전파흡수체

4.1 광대역화 전파흡수체의 기본식

4.2 광대역화 전파흡수체의 최적설계

4.3 흡수성능평가 시뮬레이션

5. 결 론

참고문헌

Abstract

Recently, according to the development of electromagnetic wave technique, more frequent and powerful wave radiation becomes inevitable and so electromagnetic environments has become worse accordingly. Electromagnetic wave absorber is known the most effective preventive remedy to cope with the EMI/EMC problem.

To realize broad-band electromagnetic wave absorber, triple layered structure where an air layer is interposed between a sintered ferrite layer and a rubber ferrite layer was adopted. Computer simulation for optimum design and evaluation of absorption characteristics has been made. The results show that designed broad-band electromagnetic wave absorber can be useful for EMI/EMC problem, especially reducing TV ghosts in both VHF and UHF bands by additionally attaching an air layer and a thin rubber ferrite layer on the surface of conventional ferrite, without replacing it.

* 正會員, 韓國海技研修院

** 正會員, 韓國海洋大學

1. 서론

우리가 살고 있는 지구상에는 태양이나 별로부터 오는 전자파, 통신에 이용되는 전자파, 전력선으로 부터 발생하는 전자파 등 매우 다양한 종류의 전자파가 공존하고 있다. 이와 같은 전자파의 덕분으로 인간은 문명생활을 영위하고 있는 반면에, 원하지 않은 전자파의 발생으로 인해 여러가지 장애를 받고 있다는 부정적인 측면도 무시할 수 없다. 전자파장애의 영향은 라디오 수신시의 잡음, TV 전자파의 수신시 허상발생 등 사소한 예도 있지만, 전자파장애로 인해 공장내의 작업 로봇이 오동작을 일으켜 인명피해까지 발생시킨 심각한 예도 보고 되고 있다.^{14), 15)}

얼마전 걸프전에서는 전파교란으로 상대방의 레이더나 첨단 전자장비를 무력화시킴으로써 전쟁의 승패에도 커다란 영향을 미칠 수 있다는 것을 보여 주었다. 최근 MHz대 이상의 주파수 영역에 있는 전자파의 이용이 급격히 증가하고 있어서 전자파장애의 문제는 더욱 심각해 지고 있으며, 따라서 여기에 대한 조사, 연구와 대책수립이 시급하다. 전자파장애에 대한 대책은 불필요한 전자파가 기기에서 새어나오지 못하게 하는 방안과 어느 정도의 전자기장의 세기에는 기기가 정상작동을 할 수 있도록 설계하는 두가지가 병행이 되어야 한다. 또한, 전파가 새어나가지 않게 하거나 입사한 전파를 흡수해서 장애를 일으키지 않도록 하는 전자흡수체의 개발을 서두르는 것도 중요하다.

선진국에서는 이미 오래전부터 EMI/EMC분야의 중요성을 인식하고 전자파장애에 대하여 그 발생 및 전달경로를 해석하는 한편 불요전자파의 배제, 방지 등 원천적 대책기술 개발을 위하여 노력하고 있으며 EMI/EMC관련 규정을 제정하여 규제를 강화하고 있다. 국내에서도 늦었지만 1989년 12월 30일 전파관리법에 전자파장애검정 시행의 법적 근거를 마련한 후 1990년 9월 3일 전자파장애검정규칙을 제정하여 이 문제를 국가적 차원에서 다루기 시작하였다.

EMI 또는 EMC와 관련한 대책으로는 일반적으로 접지(grounding), 차폐(shielding) 및 흡수

(absorbing)의 방법이 사용되고 있는데, 접지나 차폐의 방법은 내부의 발전기 등에 간섭을 일으킬 뿐만 아니라 차단벽 등에 틈이 있는 경우에는 그 효과가 현저히 저하되기 때문에 최근 흡수의 방법에 관심이 지대해지고 있으며, 따라서 전파흡수체의 연구개발이 활발히 이루어지고 있다.¹⁶⁾

그러나 대부분의 전파흡수체는 모든 주파수의 전파를 전부 흡수할 수 있는 것이 아니고 특정 주파수의 전파에 대해서만 그 성능을 발휘하는 것이 일반적이다. 비록 넓은 주파수 범위에서 흡수성능이 양호한 전파흡수체가 있다고 하더라도 그 두께가 너무 두꺼워서 실용성에는 문제가 있다. 특히 국제적으로 정보기술장치(ITE : Information Technology Equipment)에 대한 EMI/EMC관련 규제대상인 30-100 MHz의 주파수범위에서 사용할 전파흡수체를 유전체 재료로 구성하려고 하면 그 두께가 1.5m 이상이 된다.^{10), 12)}

따라서 이러한 주파수대에서 사용하는 전파흡수체는 페라이트 투자율의 주파수분산특성을 이용한 자성손실계 전파흡수체가 이용되고 있다. 현재 개발된 페라이트 전파흡수체는 두께 8mm 정도로 100% 전후의 비대역폭(정재파비 1.2이하)을 가지므로 400 MHz 정도의 주파수대까지는 특성이 양호하여 VHF TV 허상대책용으로 실용화 되어 있으나 그 이상의 주파수범위에서는 이용할 수 없다.

본 연구에서는 기존 페라이트 전파흡수체가 가지고 있는 이러한 문제점을 해결하기 위해 이미 시공되어 있는 페라이트층위에 공기층과 고무 페라이트층을 적층함으로써 입력 임피던스를 변화시켜 기존 페라이트 전파흡수체로는 불가능하던, 1 GHz까지 이용이 가능한 광대역화 전파흡수체의 실현을 목표로 하고 시뮬레이션을 통하여 최적 설계조건 및 그 성능을 평가한다.

2. EMI/EMC

2.1 EMI/EMC의 개념

EMI(Electromagnetic Interference) 및 EMC(Electromagnetic Compatibility)에 대한 용어의

정의 및 개념이 국제적으로도 일반화되어 있지 않고 다양할 뿐만아니라, 우리말 용어도 아직 표준화되어 있지 않다. 현재 국내에서 통용되고 있는 정의를 살펴보면, EMI는 전자파간섭 또는 전자파장해로 번역하여 사용하고 있다. 법규에는 “방사 또는 전도되는 전자파가 다른 기기의 기능에 장애를 주는 것”으로 정의하고 있다. 전자기기의 동작중 불가피하게 발생하는 불요전자파는 전자기적인 간섭을 일으켜서 회로의 기능을 약화시키고, 동작을 불량하게 하여 전자기기의 고장, 오동작을 유발시킬 수 있다.

EMC는 전자파환경의 양립성/적합성으로 칭하고 있으며 양립성이란 기기와 부품이 노이즈를 내지도 않고, 노이즈에 영향을 받지 않는다는 것을 의미한다. 법규에는 “전자파를 주는 측과 받는 측의 양쪽에 적용하여 성능을 확보할 수 있는 기기의 능력”이라 정의하고 있다.

이와 같은 EMI/EMC 문제를 해결하기 위해서는 2가지 측면으로 접근할 수 있는데 하나는 불요전자파를 억제하는 방법이고, 다른 하나는 어느 정도의 전자기적 환경에서는 장애를 받지 않고 정상적으로 동작할 수 있도록 하는 것이다.^{13), 14)}

2.2 전자파장해의 사례

전자파장해의 예는 지각할 수 없을 정도로 미미한 예도 있지만 심한 경우에는 치명적일 수도 있다. 최근 외국의 여러나라에서 전자파가 인체나 동물에 미치는 영향에 대해서도 활발한 연구가 진행되고 있다.^{13), 14)}

지금까지 발표된 전자파장해의 몇몇 사례를 소개하면 다음과 같다.

1) NASA의 소형 로켓이 발사준비중에 낙뢰로 인한 전자파에 의해 저절로 발사되었다.

2) 일본에서 공장내 크레인에서 발생된 전자파에 의해 NC선반의 제어부가 오동작하여 작업원이 사망한 예가 있다.

3) 공장의 가스압축기 출구에 설치되어 있는 온도 경보기가 근처에서 사용하고 있는 휴대용 무전기의 전자파에 감응되어 오동작함으로써 Plant 시설이 정지된 예가 있다.

4) 항공 관제용 레이더의 모니터에 스파크상태의 방해가 계속 들어와 조사한 결과, 근접 민가의 지붕에 설치된 TV용 부스타가 발전하는 것에 의한 것으로 판명되었다.

5) 무선으로 운전하는 열차의 운행이 인근 전자 오락실에서 새어나온 전자파에 의해 정지된 사례가 있다.

6) 포지가공 공장의 제품검사용 PC가 포지에 대전된 정전기가 방전될 때 발생하는 전자파에 의해 오동작을 반복한 예가 있다.

7) 자동차의 정속주행장치(Cruise Controller)가 곁에 부착된 고성능 라디오 때문에 오동작한 예도 있다.

2.3 전자파장해의 방지대책

1) Noise 측정과 Shield Room

EMC/EMI 관련분야에서는 여러가지 시험이 행해지고 있는데, Noise 측정은 전자기기를 동작시킬 때 그것으로부터 발생하는 전자파의 세기나 변화를 측정하는 것을 의미한다. 그러나 EMI/EMC의 측정을 정확히 하기 위해서는 외부전자파의 영향을 받지않는 공간에서 행하여져야 한다. 이러한 공간으로 Open Site, Shield Room, 전파암실을 들 수 있다. 여기서 Open Site는 주위에 전파를 반사하는 구조물이 없는 넓은 공간을 말하고, 실드룸은 차폐체를 이용하여 공간적으로 전자파를 차단하는 환경을 말한다.

또 전파암실은 내부벽면에 전파흡수체를 부착함으로써 내부에서 발생하는 전파는 벽면에서 흡수되어 반사파가 발생하지 않도록하여 자유공간과 본질적으로 같도록 한 공간이다. 이 중 어느 것을 택할 것인가는 성능, 가격, 조립, 형상의 자유도 등을 다각도로 검토한 후 결정해야 한다.

2) 대책일반

(1) Grounding

회로의 신호선에 공통전위를 주어 회로의 동작안정을 도모하여, 전파에너지의 방사를 최대한 줄이기 위하여 효과적으로 접지를 하는 것이 중요하다.

(2) Shielding

금속체의 폐곡면에 의해 양측의 공간을 전자기적으로 절연함으로써 공간전자파를 차단하는 것이다. 여기에는 주로 투자율이 높은 철이나 퍼머로이를 사용하는 자기섀드, 차폐금속을 접지함으로써 행하는 정전섀드, 알루미늄, 철, 구리의 전자파흡수, 반사능력을 이용해서 섀드를 행하는 電磁섀드 등이 있다. S.A. Shielknoff는 섀드의 효과를 3개의 요소로 분해해서 고려하였다.¹⁷⁾

가. 흡수손실

흡수손실은 본질적으로 전자파가 금속판중을 통과할 때 그 에너지가 두께에 대해서 지수함수적으로 손실되는 현상으로 섀드판 내부에서 흡수된다.

나. 반사손실

반사손실은 외부공간으로부터 전자파가 입사한 경우 외부공간과 금속판의 임피던스의 불연속(mismatching)에 의해 발생하는 반사손실로서 섀드판의 표면에서 일어난다.

다. 내부반사손실

전계에 대해서는 경계면에서 거의 전반사하므로 내부반사손실은 적어서 무시할 수 있다. 한편, 자계에 대해서는, 전계와는 경계조건이 달라서 무시할 수 없다.

섀드효과는 주파수가 증가하면 흡수손실은 증가하나 반사손실은 감소하게 된다. 이와 같은 섀드효과는 재료의 특성에 의해서만 결정되는 것이 아니고, 복수발신원 상호간의 간섭, 공진현상 등 다수의 요인이 총합적 섀드효과에 영향을 미친다.

(3) 전파흡수체

전파흡수체는 음에 대해서는 흡음제, 빛에 대해서는 흡색에 상당하는 것으로서, 입사하는 전파를 흡수해서 열로 변환하여 반사파가 발생하지 않도록 하는 것이다. EMI 관련으로 불요전자파를 내지 않거나 또는 반사하지 않도록 하는 재료는 주로 양도체의 금속 또는 저저항체, 손실재료이다.

손실재료에는 손실기구로서 도전손실(σ), 자성손실(μ), 유전손실(ϵ)중의 어느 것인가가 사용되고 있으며 2종 이상의 손실을 동시에 이용하는 것도 있다.^{3), 9)}

대표적인 것을 보면 도전손실을 이용하는 도전손실재료로서 카아본, 고무, 자성손실을 이용하는 자성손실재료로 페라이트 소결체 또는 고무 페라이트, 유전손실을 이용하는 유전손실재료로 티탄산바륨($BaTiO_3$)이 있으며, 도전손실과 자성손실을 동시에 이용하는 카아본-페라이트 전파흡수체 등을 들 수 있다.

제2차 세계대전중 잠수함이나 비행기가 레이더에 탐지되지 않도록 하기 위하여 전파흡수체의 제작이 시도된 이래, 최근에는 교량 또는 선박의 마스트등에 의한 레이더의 허상방지용 전파흡수체 및 군사적으로는 레이더에 탐지되지 않는 전함 또는 항공기의 제작을 위한 전자흡수체의 개발이 미국을 비롯한 선진국을 중심으로 활발히 행해져 Gulf전쟁에서 Stealth전투기의 위력을 과시한 바 있다.¹⁶⁾

전자파환경대책용으로 사용되고 있는 전파흡수체의 몇가지 예를 들고 타대책과 비교하면 다음과 같다.

가. TV-Ghost대책용 전파흡수체

고층건조물로부터의 반사파에 기인하는 TV-Ghost에 대한 대책으로서 안테나의 지향성을 개선하거나 TV수신기 내에서 소거하는 방법 혹은 SHF대에 의한 재방송 등도 있지만 결정적인 방법은 되지 못한다.

이와 같은 경우 건조물의 벽면에 전파흡수체를 부착해서 반사파를 감소시키는 방법은 장애를 일으키는 원인을 제거한다는 점에서 근원적인 해결책이라고 할 수 있다. TV전파는 VHF대이므로, 이 주파수에 대한 전파흡수체로는 소결페라이트가 가장 우수하다. 즉, 페라이트 전파흡수체는 자성손실을 이용하고 있으므로 VHF와 같이 비교적 낮은 주파수에 대해서 매우 뛰어난 전파흡수효과를 가지고 있다.

나. 레이더 허상방지대책용 전파흡수체

선박의 항로 근처에 대형교량이 있거나 선박자체의 구조로 인해 다중반사가 일어나면 레이더에 허상이 발생한다.

즉, 교량에 의한 간접 반사파로 인해 선박이 없는 곳에 선박이 나타나기도 하고 교량의 상에 의해 선박의 식별이 곤란하게 되어 사고의 원인

이 될 수 있다. 이러한 경우 장애로 되는 반사면에 전파흡수체를 부착하여 반사파를 제거한다면 이러한 문제점을 해결할 수 있다.

다. 전파압실용 전파흡수체

EMI/EMC와 관련해서 기기로부터의 잡음평가 시험을 행하기 위해서는 전자파장해를 받지 않는 공간이 필요하다.

전파압실은 내부 벽면에 전파흡수체를 부착하여, 내부에서 발생한 전파는 벽면에서 흡수되어 반사파를 발생하지 않으므로 전자파적으로 본다면 무한 공간과 동가이다. 따라서 설치공간에 크게 제약을 받는 Open Site에 비해 큰 장점이 있다.

라. 전자차폐용 전파흡수체

전자기로부터 불요전자파가 새어 나가는 것을 방지하기 위하여 금속판이나 도전성수지 등과 같은 도체에 가까운 재료로 Shielding하고 있다. 그러나 이 경우에는 틈 사이로 전파가 누설되기 쉽고, 또 기기 내부에서는 특정주파수에서 공진 현상을 일으키므로 문제가 된다. 따라서 전파흡수체를 내부에 부착하거나, 경질의 전파흡수체 수지로 case를 제작하는 것이 바람직하다.

3. 전파흡수체

3.1 전파흡수체의 종류

1) 이용가능 주파수범위에 따른 분류

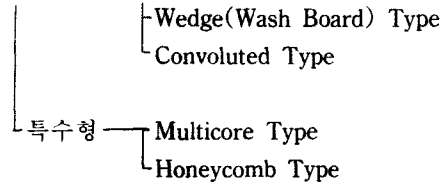
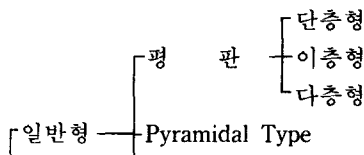
(1) N형 전파흡수체

일정한 주파수범위에서만 흡수능을 가지는 전파흡수체로서, TV ghost 방지, Radar ghost 방지, 전자레인지의 누설전파방지, 안테나특성의 개선 및 전자파회로소자 등에 이용되고 있다.

(2) W형 전파흡수체

특정주파수 이상의 범위에서 양호한 흡수특성을 가지는 전파흡수체로서, 전파압실 등에 이용되고 있다.

2) 형상에 의한 분류



3) 사용재료에 의한 분류

응용대상	사용재료에 따른 전파흡수체
TV ghost 대책용	페라이트 전파흡수체 콘크리트 페라이트 복합 전파흡수체
Radar ghost 대책용	고무페라이트계 전파흡수체 고무, 탄소계 전파흡수체 금속섬유, 페라이트 다층 전파흡수체 저항섬유계 전파흡수체 도료계, FRP계 전파흡수체
전파압실용	페라이트 전파흡수체 페라이트, 탄소계 다층형 전파흡수체 탄소계 피라미팅형 전파흡수체

3.2 전파흡수체 이론

1) 단층형 전파흡수체

두께 d의 전파흡수체를 판상으로 하여 Fig. 1과 같이 놓은 경우, 평면파의 수직입사에 대한 파동 임피던스 z는 진공중의 평면파 파동임피던스로 규격화하여 (1) 식과 같이 주어진다.

$$z = \sqrt{\frac{\mu_r}{\epsilon_r}} \tanh(j \frac{2\pi}{\lambda} \sqrt{\epsilon_r \mu_r} d) \dots\dots\dots (1)$$

여기서, λ는 입사한 평면파의 진공중의 파장이며, ε_r은 비유전율(ε/ε₀), μ_r은 비투자율(μ/μ₀)이다.

또 반사계수, $S = \frac{z-1}{z+1}$ 이므로,

완전한 전파흡수체로 되기 위한 조건은 S=0로부터 z가 1이 되는 것이다. 즉, 전파흡수체의 완전정합 조건식은 (2) 식과 같다.

$$1 = \sqrt{\frac{\mu_r}{\epsilon_r}} \tanh(j \frac{2\pi}{\lambda} \sqrt{\epsilon_r \mu_r} d) \dots\dots\dots (2)$$

(1) 비자성 재료(유전체 재료)의 경우 비자성 재료란 자석에 붙지 않는 것으로서, μ_r = 1인 재료를 말한다. 따라서 (2)식의 비투자율 μ_r을 1로 두면 (3)식과 같이 된다.

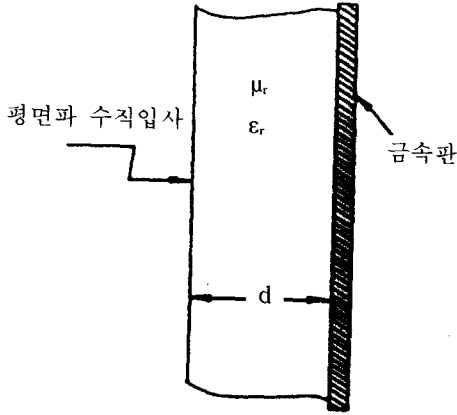


Fig. 1 Single-layered Electromagnetic Wave Absorber

$$1 = \frac{1}{\sqrt{\epsilon_r}} \tanh\left(j \frac{2\pi}{\lambda} \sqrt{\epsilon_r} d\right) \dots\dots\dots (3)$$

여기서 $\epsilon_r = \epsilon_r' - j\epsilon_r''$ 라 두고, 변수 ϵ_r' , ϵ_r'' , d/λ 로 하여 식의 해를 구한다. 이것을 풀 결과는 Fig. 2와 같다. (3)식을 만족하는 재료는 Fig. 2의 곡선위에 있는 점이므로 무수히 많이 있으며, 재료에 따라 d/λ 가 다르다는 것은 필요한 두께가 다르다는 것을 의미한다. 여기서 문제는 Fig. 2에 나타낸 것과 같은 ϵ_r' , ϵ_r'' 를 가지는 재료를 어떻게 만드는가에 있다. 하지만, 현재의 재료과학은 $\epsilon_r = \epsilon_r' - j\epsilon_r''$ 에서, ϵ_r' , ϵ_r'' 을 자유로 조절하며 설계하는 데까지 진보되어 있지 않다. 따라서 각종 재료의 ϵ_r 를 측정하여 Fig. 2에 plot시켜 보아 그것이 곡선위에 놓이는가를 조사하는 것이 현실적인 방법이다.

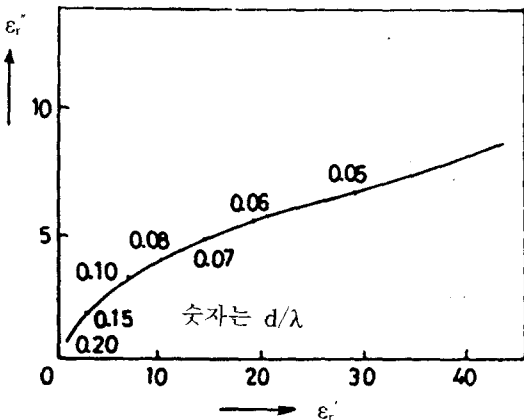


Fig. 2 Relation between ϵ_r'' and ϵ_r' Which Satisfy Matching Condition

(2) 자성재료의 경우

$$\sqrt{\frac{\mu_r}{\epsilon_r}} \tanh\left(j \frac{2\pi}{\lambda} \sqrt{\epsilon_r \mu_r} d\right) = 1 \dots\dots\dots (4)$$

비자성재료에서는 $\mu_r = 1$ 로 했지만, 자성재료의 경우는 μ_r 도 여러가지 값을 가지므로 변수가 많다. 즉 $\epsilon_r(\epsilon_r' - j\epsilon_r'')$, $\mu_r(\mu_r' - j\mu_r'')$ 및 d/λ 의 5개 변수가 있다.

(4)식을 고쳐 쓰면

$$-jw \tanh w = \epsilon_r \frac{2\pi}{\lambda} d$$

$$w = j \frac{2\pi}{\lambda} \sqrt{\epsilon_r \mu_r} d \dots\dots\dots (5)$$

(5)식의 관계를 만족하는 재료(μ_r, ϵ_r, d)가 있으면 전파흡수체는 가능하나 목표는 $d \ll \lambda$ 의 조건하에서 (5)식을 만족시켜야 하는 것이다. $d \ll \lambda$ 의 경우 (5)식에서 w 의 절대치 $|w|$ 는 $|\epsilon_r \mu_r|$ 로 큰 경우와 작은 경우가 고려된다.

가. 근사해

$w \ll 1$ 인 경우, $\tanh w \approx w$ 로 놓을 수 있으므로,

(4)식을 다음과 같이 변형할 수 있다.

$$1 = \sqrt{\frac{\mu_r}{\epsilon_r}} \left(j \frac{2\pi}{\lambda} \sqrt{\epsilon_r \mu_r} d \right) = j \frac{2\pi}{\lambda} \mu_r d \dots\dots\dots (6)$$

여기서, $\mu_r = \mu_r' - j\mu_r''$ 라고 놓으면,

$$1 = \frac{2\pi}{\lambda} \mu_r' d + j \frac{2\pi}{\lambda} \mu_r'' d \dots\dots\dots (7)$$

(7)식으로부터 $\mu_r'' = 0$, $\mu_r' \gg 1$ 인 재료에서 파장 λ 의 전파를 흡수하기 위해 필요한 두께 d 는 (8)식과 같다.

$$d = \frac{\lambda}{2\pi\mu_r'} \dots\dots\dots (8)$$

페라이트재의 μ_r 의 주파수 특성은 일반적으로 Fig. 3과 같은 형으로 되므로 공명주파수 f_r 보다 높은 주파수대에서는 상기 정합조건을 근사적으로 만족할 수 있다.

이 경우 두께 d 에 재료의 유전율 ϵ_r 이 관계하지 않는 것은 $d \ll \lambda$ 이며, 재료는 금속판에 부착되어 있으므로 재료의 내부에서 자계는 크지만 전계는 매우 약하기 때문이다. 따라서 전계에 동작하는

ϵ_r 의 효과는 나타나지 않는 것이다.¹⁰⁾

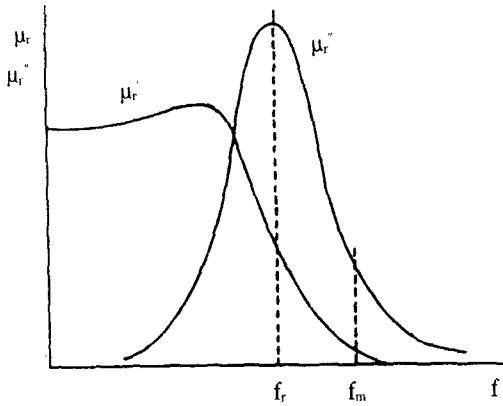


Fig. 3 The Frequency Characteristics of μ_r of Ferrite

나. 엄밀해

$w \ll 1$ 이 만족되지 않는 경우, $\sqrt{d} \ll \lambda$ 라도 $\sqrt{\epsilon_r \mu_r}$ 이 큰 경우에는 반드시 $w \ll 1$ 이 만족되지 않는다. 자성손재료, 즉 μ_r'' 의 재료를 사용하는 경우에는 유전율 $\epsilon_r (= \epsilon_r' - j\epsilon_r'')$ 을 $\epsilon_r'' = 0$ 로 해도 좋다. 즉 유전율에는 손실항이 없고 투자율의 쪽에만 손실항이 있다. $f\lambda = c$ (c 는 진공중의 광속), $\mu_r = \mu_r' - j\mu_r''$ 이라 하면 (4)식은 다음과 같다.

$$1 = \frac{\sqrt{\mu_r' - j\mu_r''}}{\epsilon_r'} \tanh\left(j \frac{2\pi}{c} \sqrt{\epsilon_r'(\mu_r' - j\mu_r'')} fd\right) \quad (9)$$

이 식의 해는 ϵ_r' 및 fd 를 매개변수로 하여 주어진 ϵ_r'' 에 대한 $fd(\text{GHz} \cdot \text{mm})$ 를 지정하고, 그때에 필요로 하는 μ_r 을 구하는 것으로 Fig. 4와 같이 된다.^{3), 8)}

이러한 조작으로 주어진 재료가 어떤 주파수에서 어느 두께일 때에 전파흡수체로 되는가가 구해진다. 페라이트의 μ_r 은 공명주파수 f_m 보다 높은 주파수범위에서는 변화의 양이 크므로, 주파수에 의한 ϵ_r 의 변화가 거의 없는 통상의 유전체와 같이 d/λ 를 결정해서 하나의 변수로 취급할 수가 없다.³⁾

또, 페라이트 흡수체는 특정 두께(정합두께 d_m)에서, 특정주파수(정합주파수 f_m)의 전파에 대해

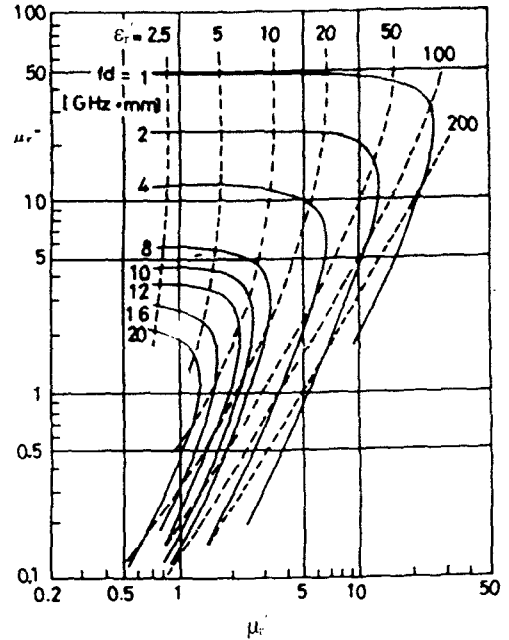


Fig. 4 Relation between μ_r' and μ_r'' Which Satisfy Matching Condition

서만 무반사 조건을 만족한다. 이에 비해 통상의 손실을 가지는 유전체의 경우에는, 무반사조건으로 해서 재료의 두께 d 와 전파의 파장 λ 의 비만이 결정되는 것이다. 따라서 각종 파장의 전파에 대해서 재료의 두께 d 를 변화시키면 무반사 조건을 만족시킬 수 있다. 하지만 페라이트와 같이 μ_r 이 주파수에 따라 크게 변화하는 경우에는, 정합주파수가 모두 각각 유일하게 정해진다.^{3), 10)}

2) 다층형 전파흡수체

(1) 유전체 재료를 사용한 광대역전파흡수체

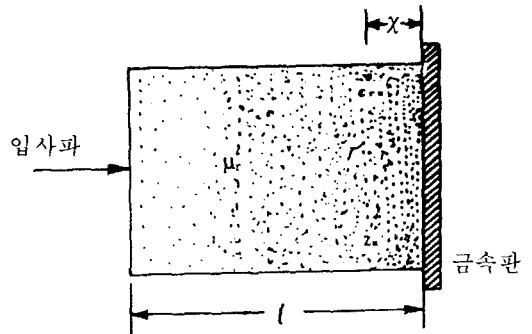


Fig. 5 Wide-band Electromagnetic Wave Absorber

Fig. 5는 전파흡수체의 매질정수를 전파의 진행 방향에 따라 서서히 변화시켜서 임피던스정합을 꾀하는 것이다. 이 경우 금속판으로부터 거리 x인 점에서의 규격화 입력임피던스 Zx는 다음의 미분 방정식으로 나타낼 수 있다.¹²⁾

$$\frac{dZ_x}{dx} = j\left(\frac{2\pi}{\lambda}\right) (1 - \epsilon_{rx} Z_x^2) \dots\dots\dots (10)$$

여기서 λ : 입사파의 파장
 ε_{rx} : x에 있어서의 매질의 복소유전율

로 하고 투자율에 대해서는 자유공간중의 μ₀가 매체중에서도 변화하지 않는 것으로 한다. 또 전파흡수체 표면에서의 규격화 입력임피던스를 z라 하면, 이 점에 있어서의 반사계수 S는 (11)식과 같다.

$$S = \frac{z-1}{z+1} \dots\dots\dots (11)$$

따라서 흡수체가 무반사로 되기 위한 조건은 z=1이다.

그러나 이것을 완전히 실현하는 것은 어려우므로 허용반사계수를 |S₀|라 했을 때, 실용정합조건은 다음 (12)식과 같이 된다.

$$\frac{z-1}{z+1} \leq |S_0| \dots\dots\dots (12)$$

따라서 (12)식을 조건으로 하여 (10)식을 풀어서 Zx를 구하면 된다.

그러나 (10)식은 Riccati의 비선형 미분방정식으로 범함수이므로 해석적 방법으로 해를 구하는 것은 어렵다. 그래서 금속판 표면으로부터 거리 x에 대한 임피던스의 분포를 각각 가정하고, 그때의 반사계수의 주파수 특성을 계산하여 최적인 임피던스 분포를 찾는 방법이 사용되고 있다. 여기서 |S₀| < 0.1인 경우, 필요한 두께의 최소치는 ℓ/λ=0.35 정도이며 이때 ε_{rx}의 값은 (13)식과 같이 된다.¹²⁾

$$\epsilon_{rx} = \epsilon_r - j\epsilon_r'' = 1 - j\{3.9(1-x/\ell) - 0.9\} \dots (13)$$

그러나 실제 이와 같은 ε_{rx}의 분포를 실현하는 것은 어려우므로 Fig. 6과 같이 부분적으로 흡수

체의 재료정수가 다른 것을 중첩한 단단형 구조로 설계하고 있다.

이 경우 자유공간 특성임피던스에 대해서 단계적으로 임피던스 정합을 행하므로 그 특성은 각 층의 두께와 재료정수에 의해서 결정된다.

단수를 증가시키면 Fig. 5의 연속분포형에 접근하지만 실용적으로는 가능한 단수를 적게 하고, 또 전체의 두께를 얇게 해서 원하는 특성을 얻을 필요가 있다.

(2) 자성재료를 이용한 광대역전파흡수체

VHF나 UHF대에서 사용할 수 있는 전파흡수체를 유전성 손실재료로 구성하려고 하면 흡수체의 두께가 매우 두꺼워지게 되어 실용적이지가 못하다.^{10), 15)} 즉, 이러한 전파흡수체는 허용정재파비를 1.1로 할 때 사용최저 주파수의 파장 λ₀에 대해서, 전파흡수체의 두께는 0.6λ₀로 되므로 100MHz 정도의 주파수대에서 사용할 전파흡수체의 두께는 1.8 m나 된다. 그러나 자성재료인 페라이트를 이용하면 VHF나 UHF대와 같은 비교적 낮은 주파수대에서도 박층으로 광대역 특성을 만족시킬 수 있다. 이것은 페라이트의 투자율이 주파수 의존성이 크다는 점을 이용한 것으로, 두께 8mm 정도에서 100% 전후의 비대역폭이 얻어진다. 통상 페라이트 전파흡수체를 광대역화 하기 위해서는, 여러 장의 페라이트판을 간격을 두고 배치하는 다층분리형이 유효하다.¹²⁾

3.3 페라이트 투자율의 주파수 분산특성

페라이트 전파흡수체가 사용되는 주파수대는 주로 VHF대 및 UHF대 이다. 이 주파수대에서 페라이트의 비유전율 ε_r은 거의 일정하여, 고무페라이트에서는 5-8, 소결페라이트에서는 8-16 정도의 값을 가지며, tanδ는 크다고 해도 0.1정도이다.⁵⁾

그러나 페라이트의 복소투자율은 주파수 의존성이 크므로, 넓은 주파수 범위에서 사용할 경우 이 점을 고려하여야 한다. 페라이트의 자화기구로 해서 자벽의 이동과 자화의 회전이 있고, 실제의 자화과정은 이러한 것들이 합성되어 일어난다. 여기에서 페라이트의 비투자율을 자벽의 이동에

의한 공명의 항과 자화의 회전에 의한 완화의 항으로 분리하여 식으로 표현하면 다음과 같다.^{3), 5), 15)}

$$\mu_r = 1 + \chi_1 + \chi_2 \dots\dots\dots (14)$$

여기서 χ_1, χ_2 는 각각의 비자화율로 다음과 같다.

$$\chi_1 = \frac{K_m f_r^2}{f_r^2 - f^2 + jrf} \dots\dots\dots (15)$$

$$\chi_2 = \frac{k_{relax}}{1 + (jf)\beta} \dots\dots\dots (16)$$

여기서

- K_m : 비초자화율(χ_1 항 관련)
- k_{relax} : 비초자비율(χ_2 항 관련)
- f_r : 공명주파수
- r : 감쇠정수
- τ : 완화시간
- β : 완화의 분산을 나타내는 계수

한편, 통상의 전파흡수체에 사용하는 페라이트인 경우에는 $f_m > 3f_r$ 로 되어, 이 주파수대에서는 공명의 항은 무시할 수 있으므로 페라이트의 비투자율을 완화의 항만으로 표시할 수 있다.⁵⁾

$$\mu_r = 1 + \frac{k_{relax}}{1 + j(f)\beta} \dots\dots\dots (17)$$

여기서 k_{relax} 는 초자화율로 $\mu_r - 1$ 이며, β 를 1로 했을 때 (17)식은 다음과 같이 된다.

$$\mu_r = 1 + \frac{\mu_r - 1}{1 + j(f/f_r)} \dots\dots\dots (18)$$

또 페라이트의 비초투자율 μ_r 와 공명주파수 f_r 사이에는 페라이트 전파흡수체가 우수하게 제조된 경우, 재료의 조성에 관계없이 다음(19)식으로 표현되는 Smoek's limit law가 있다.⁶⁾

$$\mu_r \cdot f_r = 5.6 \times 10^3 (\text{MHz}) \dots\dots\dots (19)$$

여기서 μ_r 는 재료의 조성에 의해 결정되므로, 이 조성의 선택으로 f_r 이 정하여 진다. 그리고 무반사상태로 되는 정합주파수 역시 μ_r 와 역비례 관계에 있으므로 f_m 을 결정할 수 있다.

4. 광대역화 전파흡수체

4.1 광대역화 전파흡수체의 기본식

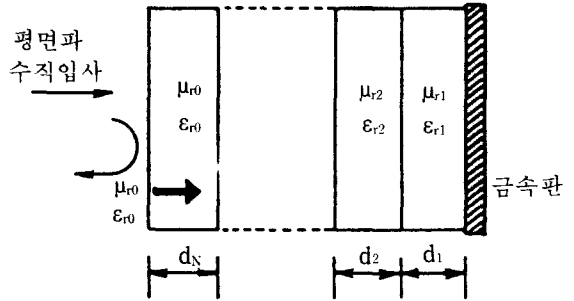


Fig. 6 Multi-layered Electromagnetic Wave Absorber

Fig. 6과 같이 흡수체의 뒤에 금속판을 부착하고, 그 전면에 N개 층의 전파흡수체를 적층한 경우, 제 N층의 두께를 d_n , 비투자율을 μ_{rn} , 비유전율을 ϵ_{rn} 으로 했을 때 평면파가 흡수체 전면에서 수직으로 입사하면, 제 N층의 전면에서 우측을 보는 규격화 입력임피던스 Z_n 은 (20)식과 같이 된다.^{7), 11)}

$$Z_n = Z_{cn} \frac{Z_{n-1} + Z_{cn} \tanh(\gamma_n d_n)}{Z_{cn} + Z_{n-1} \tanh(\gamma_n d_n)} \dots\dots (20)$$

$$(n = 1, 2, \dots\dots, n)$$

여기서 Z_{cn} 은 제 N층의 특성임피던스, γ_n 은 전파정수로서 각각 다음과 같다.

$$Z_{cn} = \sqrt{\frac{\mu_{rn}}{\epsilon_{rn}}} \dots\dots\dots (21)$$

$$\gamma_n = j\omega \sqrt{\mu_{rn} \epsilon_{rn}} \dots\dots\dots (22)$$

따라서 (21)식과 (22)식을 (20)식에 대입하여 정리하면 다음 (23)식과 같다.

$$Z_n = \sqrt{\frac{\mu_{rn}}{\epsilon_{rn}}} \frac{Z_{n-1} + \sqrt{\frac{\mu_{rn}}{\epsilon_{rn}}} \tanh(j \frac{2\pi}{\lambda} \sqrt{\mu_{rn} \epsilon_{rn}} d_n)}{\sqrt{\frac{\mu_{rn}}{\epsilon_{rn}}} + Z_{n-1} \tanh(j \frac{2\pi}{\lambda} \sqrt{\mu_{rn} \epsilon_{rn}} d_n)} \dots\dots\dots (23)$$

이 경우 $n=1$ 일 때, Z_{n-1} 은 금속판의 임피던스를 의미하므로 0이다. 또 이 흡수체 전면에서의

반사계수는,

$$S_n = \frac{Z_n - 1}{Z_n + 1} \dots\dots\dots (24)$$

와 같이 된다. 따라서 허용 반사계수를 $|S_0|$ 라고 했을 때,

$$S_n = \frac{Z_n - 1}{Z_n + 1} \leq |S_0| \text{을 조건으로 하여 전체}$$

두께를 최소로 하는 페라이트 전파흡수체를 설계 하면 된다.

(23)식에 의하면 이미 재료정수를 알고 있는 페라이트를 적층한 경우, 각층의 두께를 적절하게 조절함으로써 전체 입력임피던스를 변화시킬 수 있으며 (24)식에 의해 반사계수도 조절이 가능하므로 전파흡수특성을 변화시킬 수 있음을 알 수 있다. 따라서 이미 시공되어 있는 전파흡수체 위에 적절한 재료정수를 가지는 전파흡수체를 추가로 적층함으로써 기존 전파흡수체로 cover할 수 없는 주파수대역에서도 전파흡수특성이 뛰어난 전파흡수체를 설계하는 것이 가능하다. 물론 이 경우 단층 전파흡수체보다 두께가 두꺼워지는 것은 피할 수 없다.

4.2 광대역화 전파흡수체의 최적설계

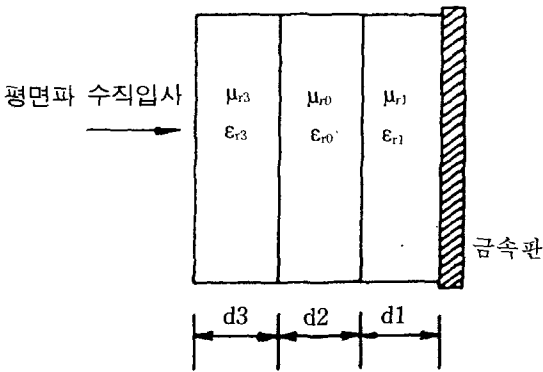


Fig. 7 Broad-band Electromagnetic Wave Absorber

Fig. 7과 같이 제 1층은 소결페라이트, 제 2층은 공기, 제 3층은 고무페라이트로 된 3층구조의 설계를 시도하여, 두께를 최소로 하면서, 30MHz에서 1GHz의 범위에서 -20dB 이상의 흡수성능을 가지는 전파흡수체의 실현을 목표로 한다. 이 광

대역화 전파흡수체가 주로 이용되는 주파수대는 VHF대 및 UHF대 이므로, 이 경우 페라이트의 비유전율은 거의 일정한 값을 가진다. 여기서 소결페라이트의 비유전율은 9~16, 고무페라이트의 비유전율은 3~4-j1.2 정도의 값을 가지고, 초투자율은 소결페라이트인 경우는 2000, 고무페라이트에서는 15 정도인 재료를 사용하는 것으로 한다. 또 비투자율은 투자율의 완화형 분산을 표현한 (18)식을 이용하여 주파수에 따른 변수로 하여 계산한다. 먼저 주어진 재료정수를 가지고 각층의 두께를 변화시켜 가며 흡수체의 전면에서 본 규격화 입력임피던스 Z_n 과 반사계수 S_n 을 (23)식과 (24)식으로 구하고, 허용반사계수 $|S_0|$ 를 -20dB로 하였을 때 $S_n \geq |S_0|$ 를 만족시키는 주파수 대역폭과 d_1, d_2, d_3 를 구한다. 각각의 경우를 비교하여 반사레벨이 -20dB이하로 되는 주파수대역이 30-1000MHz 정도이면서 전체두께 $d_1 + d_2 + d_3$ 를 최소로 하는 각층의 두께를 구하고, 단층 페라이트 전파흡수체와 비교하여 전파흡수 성능의 개선을 평가한다.

4.3 전파흡수성능평가 시뮬레이션

1) 시뮬레이션 Flow chart

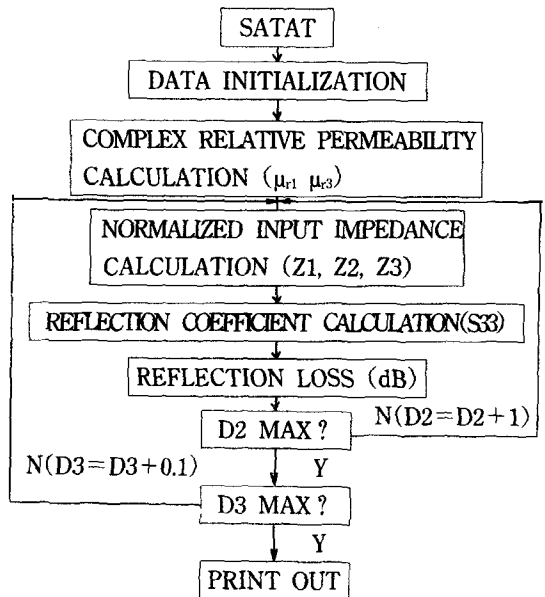


Fig. 8 Flow Chart for Optimum Design and Evaluation on Frequency Characteristics of Broad-band Electromagnetic Wave Absorber.

2) 전파흡수성능평가 시뮬레이션 결과 및 검토

(1) Fig. 9는 두께와 주파수의 변화에 따른 단층 소결페라이트 전파흡수체의 전파흡수특성을 나타낸 것으로, 두께 8mm에서 최대의 흡수성능을 가지는 것으로 나타난다. 이것은 전술한 이론과 일치하는 결과이다.

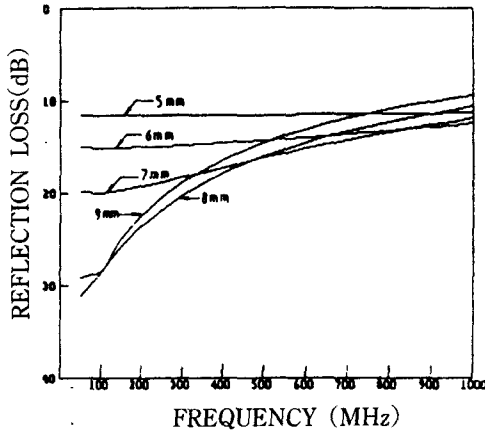


Fig. 9 Frequency Characteristics of Single-layered Absorber Composed of Sintered Ferrite

(2) Fig. 10은 소결페라이트와 고무페라이트의 2층만으로 적층된 경우, 소결페라이트층의 두께는 8mm로 일정하게 두고, 주파수와 고무페라이트의 두께를 변화시켰을 때의 전파흡수특성을 나타낸 것으로, 고무페라이트층의 두께를 증가시키면 반사레벨이 -20dB이하로 되는 주파수 범위가 넓어짐을 알 수 있다.

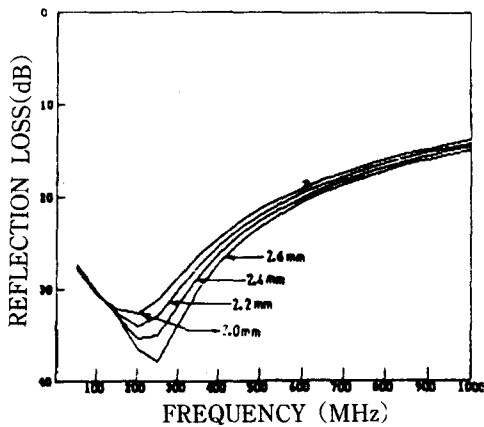


Fig. 10 Frequency Characteristics of Double-layered Absorber Composed of Sintered Ferrite and Rubber Ferrite

(3) Fig. 11은 본 논문에서 제안한 광대역화 전파흡수체의 전파흡수특성을 나타낸 것으로 최대의 주파수 대역폭을 가지는 공기층 및 고무페라이트층의 두께가 각각 존재함을 알 수 있다.

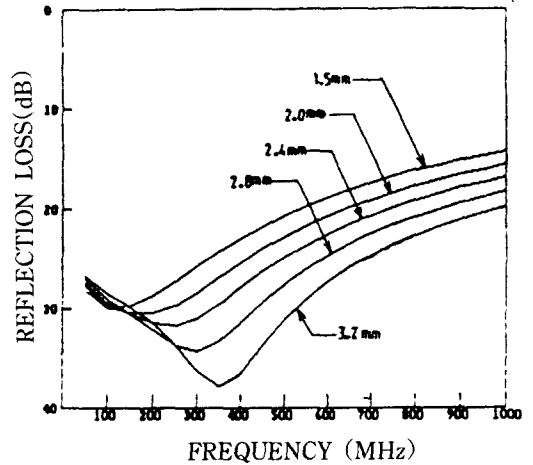


Fig. 11 Frequency Characteristics of Broad-band Absorber

(4) Fig. 12, Fig. 13은 단층 페라이트 전파흡수체 및 소결페라이트와 고무페라이트만으로 적층된 전파흡수체와 광대역화 전파흡수체의 전파흡수특성을 서로 비교한 것으로, 소결페라이트 단층인 경우에 비해서는 반사레벨이 -20dB 이하로 되는 주파수 대역폭이 현저하게 증가함을 나타내고 있다.

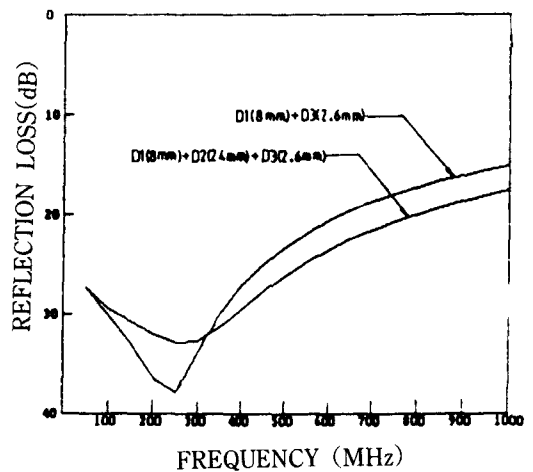


Fig. 12 The Comparison of frequency Characteristics of Broad-band Absorber with Double-layered Absorber

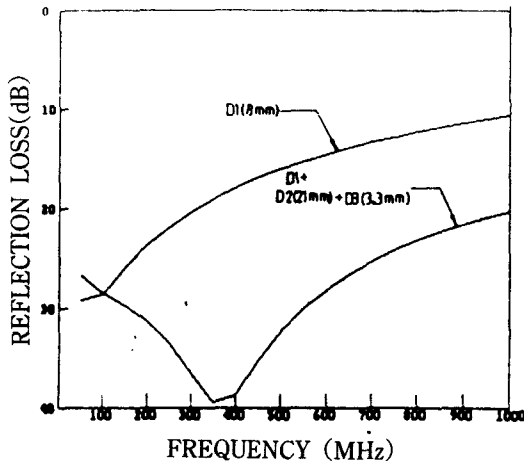


Fig. 9 The Comparison of frequency Characteristics of Broad-band Absorber with Single-layered Absorber

5. 결 론

1) 시뮬레이션에 사용한 소결페라이트 전파흡수체는 두께가 8mm에서 최대의 흡수성능을 나타내었다.

2) 가운데 공기층을 삽입한 광대역화 전파흡수체가 소결페라이트와 고무페라이트의 2층만으로 적층된 전파흡수체에 비해 320MHz 정도 이상의 주파수 대역에서는 범위에서는 흡수성능이 우수하게 나타난다.

3) -20dB 이하의 반사레벨을 가지는 주파수 대역폭은 고무페라이트층의 두께가 0.1mm씩 증가하면 공기층의 두께는 0.4mm씩 감소하는 것으로 나타난다.

4) 30MHz에서 1GHz까지의 주파수대역에서 -20dB 이하의 반사레벨을 가지는 광대역화 전파흡수체는 소결페라이트층 8mm, 공기층 21mm, 고무페라이트층 3.3mm 정도에서 실현되었다.

參 考 文 獻

1) 金東一, 鄭世謨 외, "카아본-페라이트 전파흡수체의 특성", 대한전자공학회논문지, 제26

권 제11호, pp. 92-97, 1989. 11.
 2) 金東一, 鄭世謨 외, "X-밴드 레이더용 전파흡수체의 개발에 관한 연구", 한국항해학회지, 제14권 제1호, pp. 9-19, 190. 3.
 3) 内藤, "電波吸收體", 新 OHM 文庫, オーム社, 1987.
 4) Y. Naito, K. Suetake, "Application of Ferrite to Electromagnetic Wave Absorber and Its Characteristics", IEEE Trans. on MTT, Vol. 19, No. 1 pp. 65-72, Jan. 1971.
 5) 森田孝, 吉田則信, 深井一郎, "ヒステリ시스および緩和特性を考慮したフェライト 電波吸收體の空間回路網法による解釋", 日本電子情報通信學會論文誌, B-11 Vol. J73-B-11, No. 9, pp. 464-471, 1990. 9.
 6) 内藤 外, "フェライト吸收壁の電波吸收特性", 日本電子通信學會論文誌, 69/1 Vol. 52-B, No. 1, pp. 26-30, 1969.
 7) 橋本 外, "フェライトを用いた簡易形電波音室の實用設計", 日本電子情報通信學會論文誌, B-11 Vol. J73-B-11, No. 8, pp. 421-431, 1990. 8.
 8) 内藤 外, "ゴムフェライト吸收壁の電波吸收特性", 日本電子通信學會論文誌 B, Vol. 52-B, No. 4, pp. 242-247, 1969. 4.
 9) 清水康敬, "電波吸收體", 日本電子通信學會論文誌, Vol. 68, No. 5, pp. 546-548, 1985. 5.
 10) 内藤 外, "フェライト吸收壁の厚さについて", 日本電子通信學會論文誌 B, 52-B, 1, pp. 26-30, 1969. 1.
 11) 金敬龍, 金旺燮, 李琮撥, "페라이트-페라이트 적층체의 전파흡수 거동", 전자공학회논문지, 제28권 A편 제8호, pp. 594-599, 1991. 8.
 12) 長岡政四 外, "廣帶域大型電波無響室の特性について", 電子航法研究報告書, No. 29, 1980. 12.
 13) 関康賛, "전자파 환경공학 핸드북, 노이즈종합대책", 성안당, pp. 71-76, 1991. 4.
 14) 金能秀 외, "전자파장해(EMI/EMC)", 산업기술정보원, pp. 3-10, 1991. 7.

- 15) 内藤 外, “フェライト 電波吸収體の普遍的特性圖, 日本電子通信學會論文誌B-11, Vol. J72 -B-11, No. 1, pp. 48-54, 1989. 1.
- 16) 김동일, “전파흡수능 측정기법 연구”, 국방과학연구소기술보고서, 1991. 3.
- 17) 友野理平 外, “電子波 Shieldの基礎”, CMC, pp. 11-12, pp. 101-105, 1986. 8.