

I. 서론

전자파 흡수체(electromagnetic wave absorber)는 전자파 에너지를 열 에너지로 변환시키는 재료이다^[1]. 의미상으로는 더미 로드(dummy load)가 전송 선로(transmission line)에서 정합된 부하(load)로 전자파 에너지를 열로 소멸시키는 역할과 같다^[2]. 공간에 방사되는 전자파를 소멸 및 감쇠하는 역할을 하는 전자파 흡수체의 효시는 제2차 세계대전 중 독일군이 연합군 측의 레이더에 포착되지 않기 위하여 U-Boat 잠수함의 잠망경 외피에 전자파 흡수체를 사용한 것이다^[3].

전자 통신 산업의 급속한 발달로 전자파와 디지털 기기의 사용 증대 및 다양화를 가져오면서, 이와 동시에 전자파 환경이 현저하게 악화되고 있다. 특히 전자 장비와 통신 장비가 소형화, 경량화, 고기능화 됨에 따라 클럭타임(clock time)이 증가되고 있는 추세이다. 이에 따라 불요 전자파 간섭(EMI, electromagnetic interference)으로 인한 악영향이 늘어나고 있어서, 사용하는 전자 부품에 대한 고주파 특성을 개선할 필요가 있다^{[4],[5]}.

전자파 환경의 악화는 TV수신시 나타나는 고스트(ghost) 현상에서부터 선박 및 항공기의 레이더에 나타나는 허상, 각종 산업 현장에서 사용되는 전자 장비의 오동작에 이르기까지 광범위하게 영향을 미치고 있다. 따라서 불요 전자파 간섭으로 야기되는 사회문제가 심각한 실정이며, 이에 대한 대책이 요구되고 있다. 일례로, 매일 경제 신문에 의하면, 국내 자동차 3사에서 전자파 장애로 추정되는 공장 내 사고가 모두 22건에 달한다고 보도한 바 있다^[6]. 이와 같은 사고는 산업 현장에서 공장 자동화 시설을 증설하고 있는 추세이므로 더욱 증가할 것이다.

그러므로 EMI에 의한 사고 예방과 불요 전자파의 유해성에 대한 논의와 대책이 시급하며, 현재 관련 분야에서는 이에 관한 검토가 진행되고 있다^[7].

EMI 방지 대책으로 크게 두 가지 방안이 있다. 첫째, 불요 전자파의 발생 자체를 막는 것이고, 둘째, 전자파 흡수 또는 차폐 재료를 개발하는 것이다.

본 고에서는 재료에 관한 이해를 돕고자 전자파 흡수체에 관하여 논하고자 한다.

II. 전자파 흡수체의 개요

2-1 전자파 흡수체의 용도

전자파 흡수체는 최초로 레이더에 포착되지 않기 위하여 잠수함의 잠망경 보호 외피로 사용된 이후 그 용도가 점차 증가하였다. 근래에는 군용으로 스텔스기의 동체 피복에 이용되는 각종 레이더파 대역(X밴드, Ku밴드, L밴드 등) 흡수체가 개발되었고, 민수용으로는 안테나의 패턴 특성을 개선하기 위하여 안테나 뒷면 등에 흡수체가 사용되고 있다. 또한 물체나 장치에서 발생하는 불필요한 전자파의 반사를 감소시키고, 물체의 RCS(radar cross section)를 감소시키기 위하여 사용되기도 한다. 그리고 자유 공간의 종단기(terminal)나 도파관(wave guide)에서 차폐 효과(shielding effectiveness)를 증진시키기 위하여 사용되고 있다^[3].

최근에는 전자 제품에 대한 EMI규제가 강화됨에 따라, 제품에서 발생하는 전자파를 측정하는 문제가 절실히 요구되고 있으므로, 전자파 흡수체가 전자파 측정을 위한 자유 공간인 전자파 암실(anechoic chamber)건설용 재료로 사용되고 있다. 또한 유도부기 등의 점화를 위한 착화기에 사용되

나, 차량의 증가와 함께 늘어나는 교통사고 시에 인체를 효과적으로 보호할 수 있는 에어백의 점화장치에도 신뢰성과 안전성을 확보하기 위하여 사용되고 있다^{[8],[9]}.

2-2 전자파 흡수체의 특성

VHF, UHF, MW, mmW영역의 전자파를 연구하는 학자들은 전자파 흡수 특성을 나타내는 물질에 대한 연구도 시도하였다. 전자파 흡수체는 이용분야마다 요구되는 특성이 각기 다르기 때문에 물질의 제반 성질에 관한 연구가 필수적이다.

물질의 제반 특성으로는 전자파 흡수 주파수 대역, 반사도 등의 전자파 흡수 특성과 저항, 전도도, 전력의 흡수성과 같은 전기적 특성, 그리고 인장 강도, 충격 강도, 연신률, 탄성계수, 경도, 유연성 등의 기계적 강도가 있다. 또한 결정 구조, 밀도, 큐리 온도, 무게, 두께 등의 물리적 특성과 내열성, 방염성, 내후성, 경제성 등이 있다.

그러나 전자파 흡수체의 성능은 주파수 대역폭(band width), 정합 두께(matching thickness), 정합 주파수(matching frequency)등으로 평가된다^{[10],[11]}.

Ⅲ. 전자파 흡수체의 종류

전자파 흡수체는 층수, 형상, 주파수, 손실 기구에 따라 4가지로 분류하고 있다. 첫째, 층수에 따라서는 단층형, 복층형, 다층형으로, 둘째, 형상에 따라서는 평판형(planar), 산형(wave), 피라미드형(pyramidal)으로, 셋째, 주파수 흡수 범위에 따라서는 협대역, 광대역, 초광대역으로, 넷째, 손실 기구(loss mechanism)에 따라서 도전 손실형(conductive loss), 유전 손실형(dielectric loss), 자성 손실형(magnetic loss)으로 세분하고 있다^[11].

3-1 층수에 의한 분류

전자파 흡수체의 층수에 의한 분류에서 단층형은 단일 재료나 조성으로 구성된 흡수체로서 일반적으로 전자파 흡수 대역폭이 좁다. 복층형과 다층형은 각 층마다 흡수 대역폭이나 손실 기구가 다른 흡수체를 적층하여 광대역의 흡수 특성을 갖도록 하는 것이 주목적이다. 단층형보다는 복층형과 다층형이 흡수 특성은 우수하지만, 제조 공정이 복잡하기 때문에 많은 비용이 든다. 반면, 단층형은 전자파의 흡수 대역폭만 넓게 할 수 있다면 여러 가지 면에서 유리하다^[10]. 또한 복층형에는 복합재료(composite materials) 형태의 것이 포함되기도 한다. 단순히 적층하는 것이 아니라 단일층에 균일하게 혼합된 형태나 경사 기능 재료(Function graduation material)와 같이 단일층이지만, 복층형의 효과를 얻을 수 있는 형태이다. 10 GHz대역의 전자파 흡수체들이 이러한 복합재료 형태로 제조되고 있다.

3-2 외형상에 의한 분류

외형상의 분류중 피라미드형은 최대의 흡수도를 위한 형상이지만 취급이 불편하고, 작업 공간이 협소해지는 단점이 있다. 그리고 주로 스티로폼(styrofoam)과 같은 발포체에 전자파 손실형 물질을 함침시켜 제조하기 때문에 두꺼운 발포체에 균일한 함침이 어렵다. 이에 비해 평판형은 체적이 작고 내구성이 우수하고, 함침이 용이하며 취급이 간편하다. 산형은 상기 두 가지형을 절충한 것이다. 피라미드형이나 산형은 전자파 흡수시 형상의 변화로 임피던스의 정합을 유도하였으며, 입사된 전자파가 반사되어도 흡수체의 타 부분으로 산란되도록 하였다. 만약 평판형이 타 형상보다 흡수 특성이 우수하다면, 활용 공간이 넓고 보관이나 사용이 편리하므로 유리할 것이다^[10].

3-3 손실 기구에 의한 분류

손실 기구에 의한 분류중 도전 손실형은 물질 중의 자유전자가 입사된 전자파에 의하여 유기되는 전기장으로 인하여 물질 내에서 흘러갈 때 발생하는 손실을 이용한 것이다. 즉 전기가 저항체를 지날 때 전기 에너지가 열로 변환되는 것과 동일한 손실 기구이다. 도전 손실형 전자파 흡수체로서는 C, SiC 등이 있으며, 지지 물질(support material)에 함유시켜 사용한다. 지지 물질로는 발포 스티로폼, 발포 우레탄, 그리고 합성고무 등이 사용된다. 주로 전자기기 특성 실험을 위한 전자파 암실용 무반사 흡수체로 사용되며, 각 재료의 합성 비율과 분산 정도에 따라 흡수 특성이 좌우된다. 발포체를 지지 물질로 사용하는 경우에는 화재 시에 유독 가스 발생 등의 문제를 야기시키기도 한다.

유전 손실은 유전체 물질에 전기장을 가했을 때 전기장 변화가 빨라지면 쌍극자의 시간적 변화가 대응하지 못하므로 인하여 발생하는 손실이다. 여기에 속하는 물질로는 H_2O , $BaTiO_3$ 과 PMN-PT 등이 있다. 유전 손실형 전자파 흡수체도 상기 도전 손실형 전자파 흡수체와 동일하게 유전체 물질과 지지 물질을 혼합하여 사용한다.

자성 손실은 와전류 손실(eddy current loss), 이력 손실(hysteresis loss), 잔류 손실(residual loss) 등의 3가지 손실 기구(loss mechanism)에 의해 발생된다. 와전류 손실은 주로 강자성체 내에서 전기장에 의해 유도된 전류 주위에 소용돌이 형태의 자기장이 발생하고, 발생한 자기장만큼 전류가 손실된다. 이력 손실은 자기장의 변화로 인한 자성체내에서 에너지의 손실이며, 주파수가 높아질수록 커지고, 저항과는 반비례 관계를 갖는다. 잔류손실은 전체 손실에서 이력 손실과 와전류 손실을 제외한 나머지 값으로 나타낸다. 잔류 손실은 주로 전기 저항이 큰 페라이트가 고주파 영역에서 사용시에 발생하는 손실이다. 자성 손실형 전자파 흡수체로서 페라이트가 사용되며, 페라이트 소결체는 1GHz 이하의 낮은 주파수에서 사용되나, 페라이트 분말과 지지 물질을 혼합하면 1GHz 이상의 높은 주파

수대에서도 사용된다^[10].

IV. 페라이트계 전자파 흡수체

페라이트는 자성을 가진 모든 세라믹스를 말하며, 좁은 의미에서는 Fe_2O_3 를 주성분으로 한 자성 산화물을 통칭한다. 고대인이 자석의 존재를 알게 되면서 자철광 등의 천연 광물을 철의 페라이트라고 하였다. 페라이트는 장난감에서부터 각종 첨단 장비까지 폭 넓게 이용되고 있다.

페라이트에 대한 연구는 18세기 중엽부터 시작되었으며, 연자성체의 대표 주자로 사용되는 연질 페라이트는 1946년 필립스사에 의해 처음으로 제반 성질이 발표된 이후 급성장을 하였다. 전자파 흡수체로 널리 사용되는 것은 연질 페라이트 중에서도 스피넬(spinel) 결정 구조를 갖는 것으로 $MO \cdot Fe_2O_3$ (M은 2가의 금속 이온)의 화학식을 갖고 있다.

페라이트계 전자파 흡수체는 자성 손실형이며, 전기적 절연성, 내식성, 내마모성 등이 우수하고, 부피가 작고, 견고하여 취급이 용이하며, 특히 전자파 암실 등의 용도로 사용될 때 방염성이 뛰어나 화재로 인한 인적, 물적 피해를 최소화할 수 있다. 그러나 전자파 에너지를 90 %(-10 dB)내지는 99 %(-20 dB)를 흡수할 수 있는 주파수 대역이 협소한 단점이 있기 때문에 UHF (470~770 MHz)대역에서 사용이 가능한 Ni-Zn계 페라이트와 VHF (90~220 MHz)대역에서 사용이 가능한 Mn-Zn계 페라이트로 구분되고 있다. 이들 흡수체는 정합 두께가 7~10 mm 내외일 때, 흡수 대역폭이 300 MHz 정도라고 알려져 있다. 따라서 협대역의 전자파 흡수 특성을 갖는 페라이트의 단점을 극복하기 위해서 각기 다른 흡수 대역을 갖는 페라이트를 복층화 혹은 다층화하여 사용하고 있다. 또한 C~X 밴드(4~12 GHz) 등과 같은 마이크로파 대역에서 사용하기 위해서는 서로 다른 손실 기구를 가진 재료들을 복합화하여 사용하고 있다^{[12],[13]}.

V. 전자파 흡수체의 특성 해석

재료의 전자파 흡수 특성을 측정하는 방법에는 직접 측정법과 간접 측정법이 있다. 직접 측정법은 전자파 암실이나 전송 선로 등에서 전자파를 재료에 입사시켜 직접 값을 얻는 방법으로, 반사계수, 정재파비, 반사 전력 측정법 등이 있다. 간접 측정법은 재료 정수인 복소투자율과 복소유전율을 측정 한 후 일정 조건하에서 전자파 흡수능을 계산하는 방법으로 정재파법, 공진법, 섭동법, 투과 반사법 등이 있다^{[11],[14]}.

1 MHz에서 1500 GHz까지의 주파수 범위에서 재료의 유전율 측정은 time domain법과 frequency domain법, 반사법, 투과법, 공진법 등으로 하고 있다. 전자파 차폐 물질과 흡수물질이 단순한 도체에서 복잡한 물질들(페라이트, 플라스틱, 도전성 박막 등)로 발전해감에 따라, 복잡한 차폐 물질의 차폐 효과 예측이 어려운 일이 되었다. 따라서 정확한 차폐 효과 데이터를 얻을 수 있는 측정 방법을 확립하는 것은 매우 중요한 연구 과제이다. 전자파 차폐 효과를 측정하는 경우에는 MIL-STD 285에 의한 차폐실을 이용하는 방법, 동축 전송 선로(coaxial transmission line)법, 이중 상자(dual box)법, 전달 임피던스(transfer impedance)법, 이중 TEM cell법 등이 있다^[15].

전자파 흡수 특성을 측정하는 여러 가지 방법 중에서 투과 반사법이 넓은 주파수 범위에서 적은 오차로 측정이 가능하다고 알려져 있다. 투과반사법은 S-parameter인 S_{11} (반사산란계수)과 S_{21} (투과산란계수)을 측정하여 재료정수를 계산하기 때문에 S-parameter법으로 불리우며, 또 동축형 샘플 홀더(coaxial sample holder)를 사용하여 측정하기 때문에 동축관법이라고도 한다. S-parameter의 장점은 측정이 용이하며, 전류나 전압을 측정하지 않는다는 점이다. 전류나 전압을 측정하면 주파수가 높은 경우에는 단락(short)과 개방(open)이 어려워

진다. 그러나 S-parameter는 각 단자의 정합에 의해 S_{11} 과 S_{21} 을 측정하기 때문에 마이크로파에서도 정확하게 측정할 수 있다^{[11],[16]}.

전자파가 매질과 만나게 되면 반사, 흡수, 투과의 3가지 현상이 일어나며, 이것을 복소투자율과 복소유전율로 나타낼 수 있다. 특히 흡수 효과를 크게 하려면 무엇보다도 임피던스의 정합(impedance matching)에 의한 무반사가 이루어져야 한다. 이러한 조건을 만족시키면서 동시에 투과를 최소화하고, 흡수를 극대화하기 위한 방안으로서 전자파를 100% 반사시키는 금속판을 전자파 흡수체의 뒷면에 붙인다. 이 경우 정합에 의한 무반사 조건 즉 입력 임피던스와 자유 공간의 임피던스가 같아져야 한다. 임피던스 정합조건은 식 (2-7)과 같이 $\mu', \mu'', \epsilon', \epsilon'', d, f$ 등 6가지 변수에 의해서 평가된다^[16]. 임피던스 정합이 되었을 때 얻어지는 흡수체의 두께와 주파수를 정합 두께(d_m , matching thickness)와 정합 주파수(f_m , matching frequency)라고 하며, 정합 두께와 정합 주파수는 여러 가지 방법으로 얻을 수 있다.

VI. 전망 및 결론

전자파 흡수체는 군수산업과 더불어 개발되었고, 발전해 왔다. 그러나 최근에는 민수 산업에서 사용도가 증가하고 있다. 특히 전자파 측정 공간인 전자파 암실에 대한 수요도 날로 증가하고 있다. ANSI^[17]나 CISPR^[18]의 규격에 의하면 전자파 암실을 시험하는 측정 주파수는 30 MHz에서 1 GHz사이이며, FCC규격(Federal Communications Commission, 미 연방 규격)^[19]에 맞는 신뢰성 있는 전자파 암실을 만들려면 과거에는 144인치 두께의 고손실 피라미드(lossy pyramid)가 필요하였다. 그러나 고손실의 페라이트계 전자파 흡수체의 개발로 인하여 0.4인치 두께로 줄일 수 있게 되었다.

전자파가 인체에 미치는 영향 등이 연구됨에 따라 각계 각층의 관심도는 나날이 증대되고 있다. 21

세기에는 전자파 흡수체의 개발로 인해 인류가 전자파 공해로부터 해방되기를 기원한다.

참고문헌

- [1] 内藤 喜之 : 電波吸收體, 新OHM文庫, 東京 (1987) 1.
- [2] Thomas R. McGuire : Physical Review, 93 (1954) 682.
- [3] 關康雄: 電波吸收體と電波暗室, シ-エムシー, 東京 (1985) 5, 101.
- [4] David M. Pozar : Microwave Engineering, Addison-Wesley, New York (1990) 4.
- [5] Jin Young Lee and Joong Geun Rhee : 1995 IEEE international Symposium on EMC, Atlanta, (1995) 543.
- [6] 매일 경제 신문 : 1990년 2월 19일.
- [7] 이종근 : 전자파 내성 평가 기술 연구, 연구보고서, 기아자동차 (1992).
- [8] K. Ishino : Electronic Ceramics, 19(65) (1988) 22.
- [9] 정재우, 이완재, 이종근, 윤기은, 이효남 : 유도무기 추진기관, 국방과학연구소 5 (1995) 210.
- [10] 정재우, 이완재 : 한국재료학회지, 5 (1995) 512.
- [11] 清水 康敬, 杉浦 行, 石野 健, 乾 哲司 : 電磁波の吸收と 遮蔽, 日經技術圖書株式會社, (1989) 4, 131.
- [12] 平賀貞太郎, 奥谷 克伸, 尾島 輝彦 : フェライト (1986) 83.
- [13] D. H. Kang, J. Y. Shin and J. H. Oh : Ferrites The 6th International Conference on Ferrites, (1992) 1335.
- [14] Y. Naito and K. Suetake : IEEE Trans. Microwave Theory and Tech., MTT-19 (1971) 65.
- [15] Bruno O. Weinschel : Microwave Journal, 11 (1990) 131.
- [16] H. M. Musal, Jr., and D. C. Smith : IEEE Trans. Magn., Mag-26(5) (1990) 1462.
- [17] American National Standard Institute : ANSI for C 63 Insitute of Electrical and Electroics Engineers, IEEE, New York, (1988).
- [18] International Special Committee on Radio Interference : Limits and Methods of Measurement of Radio Interference Characteristics of Information Technology Equipment, CISPR Publication, 22 (1985).
- [19] Federal Communications Commission : FCC Methods of Measurement of Radio Noise Emissions from Computing Public Notice No. 3281, (1982).
- [20] 정재우 : 廣帶域 電磁波 吸收用 Ni-Cu-Zn系 페라이트에 관한 研究, 박사학위논문, 한양대학교, (1995).