

ITS용 2층형 전파 흡수체(유전체/자성체) 설계 및 경사 입사 흡수 특성 해석

Design and Performance Evaluation of Two-Layered Microwave Absorbers(Dielectric/Magnetic) for Wide Oblique Incidence Angles Used for ITS

김재웅 · 김성수

Jae-Woong Kim · Sung-Soo Kim

요약

5.8 GHz의 DSRC(Dedicated Short Range Communication) 시스템을 사용하는 ITS(Intelligent Transport System)에 전자파 환경 문제가 발생하면서 광각 경사 입사 대책용 전파 흡수체의 사용이 요구된다. 5.8 GHz 주파수에서 경사 입사된 전파에 대해 낮은 반사 손실을 보이는 2층형의 전파 흡수체(유전 복합 재료/자성 복합 재료)를 설계하였다. 흡수층에는 iron flake를 filler로 사용하였다. 임피던스 정합 기능의 표면층에는 유전상수가 낮은 carbon black을 사용하였다. 각 층의 sheet는 일반적인 세라믹 혼합물 제조 공정에 의해 제작되었고, 지지재로는 가황 고무를 사용하였다. 전송 선로 이론에 근거하여 TE(Transverse Electric)와 TM(Transverse Magnetic) 편파에 대해 입사각을 변화시키며 반사 손실을 계산하였고, 자유공간법에 의해 반사 전력을 실측하였다. 입사각 55°까지 낮은 반사 손실(-10 dB 이하)을 갖는 2층형 흡수체가 설계되었다. 자유공간법에 의한 반사 전력의 실측치가 이론적 계산치와 비슷한 값을 보여 설계 방법의 타당성을 입증할 수 있었다.

Abstract

Advanced microwave absorbers for wide oblique incidence angles are required in many applications including wireless communication or vehicle identification in ITS(Intelligent Transport System) where 5.8 GHz DSRC(Dedicated Short Range Communication) system is applied. In this study, two-layered microwave absorber(with a laminate structure of dielectric/magnetic composites) has been designed for the achievement of low reflection coefficient over wide incidence angles at 5.8 GHz. Iron flake particles are used as the filler in the absorbing layer, and the magnetic composite sheet exhibits high magnetic loss due to ferromagnetic resonance in gigahertz frequencies. The surface layer of low dielectric constant containing small amount of carbon black is used as the impedance transformer. On the basis of transmission line theory, the reflection loss has been calculated for the two-layer structure with variation of incident angles for both TE(Transverse Electric) and TM(Transverse Magnetic) polarizations. At the optimum thickness of the composite layers, a low value of reflection loss(less than -10 dB) has been predicted for wide incidence angles up to 55° which is in good agreement with the measured value determined by free-space measurement.

Key words : Microwave Absorbers, Oblique Incidence, Iron Flakes, ITS

I. 서론

ITS(Intelligent Transport System)는 일반 도로나 고

「본 연구는 2006년도 충북대학교 학술연구지원사업의 연구비 지원에 의해 수행되었음.」

충북대학교 신소재공학과(Dept. of Materials Engineering, Chungbuk National University)

· 논문 번호 : 20070615-065

· 수정완료일자 : 2007년 10월 19일

속도로에서 통신이나 자동차 정보 확인 등의 기술을 제공하는 지능형 통신 시스템이다. 현재 ITS에는 주파수 5.8 GHz의 단거리 무선 통신(DSRC: Dedicated Short Range Communication)이 사용되고 있다^{[1],[2]}. ITS-DSRC는 다운 링크, 업 링크 모두 5.8 GHz의 무선 주파수대를 이용하고 우회 원편파의 편파 방식을 채택하기 때문에 전자파 간섭에 의한 정상적인 통신이 방해 받기 쉬운 단점이 있다. ITS에서 이러한 전자파 장애의 대표적인 예가 자동 요금 징수(ETC: Electric Toll Collecting) 시스템이다. ETC는 차량과 톨게이트 사이에 단거리 무선 통신(DSRC)을 통해 톨게이트 통과시 정상 주행(non-stop) 상태에서 통행료, 혼잡통행료 등 요금을 자동으로 징수하는 교통 관리 시스템으로 ITS 전체 시스템 중 하나의 중요한 분야를 차지한다. 실시간 교통 제어와 무정지 요금 징수를 통한 교통 흐름 개선 및 소통 능력을 제고시킬 수 있고, 단속 인원 감소 등 업무 효율화로 운영, 관리 비용을 대폭 절감시킬 수 있는 장점이 있다.

그러나 ETC 운용 중 도로 포장 면, 또는 통과 중인 차량에 반사된 전파가 요금소에 있는 구조물에 재 반사되어 통신 영역 밖에 있는 차량과 이상 교신하는 전자파 장애가 ETC 운용상의 큰 문제점으로 지적되고 있다. 특히, ETC 시스템 구성 시 기존 시설의 유효이용을 기도하기 위해 기존의 톨게이트 구조를 사용하고, 무선 장치 및 서비스 장치를 추가하는 방식으로 추진될 때 이러한 문제가 더욱 심각하다. 강우를 피하기 위한 캐노피(천장) 및 이를 지지하는 기둥에서의 다중 반사에 의해 ETC 톨게이트에서 측정된 DSRC 전력 프로파일은 오픈 사이트에서의 측정치와 현저한 차이를 보인다. 이것은 ETC 운용 중 도로포장 면, 또는 통과 중인 차량에 반사된 전파가 요금소에 있는 구조물에 재 반사되어 통신 영역 밖에 있는 차량과 이상 교신하는 전자파 장애 때문에 발생하는 현상이다^[3]. 이러한 전자파 환경을 개선하기 위해서는 캐노피 하면을 비롯한 요금소 주위의 구조물을 전자파를 흡수하는 구조로 할 필요가 있다. 하지만 실제 상황에서 도로나 차음벽, 오버브리지 하면, 톨게이트의 천장, 근접한 구조물 등에 의해 난반사된 전자파들이 전자파 환경을 악화시키는 통신 장애 문제가 발생된다. 이것은 규정된 통신 영역 밖에서 불요 통신이 이루어지는 결과를 초래한다^[3]. 이러한 문

제를 극복하기 위한 방법 중의 하나로서 전자 흡수체의 사용이 제안되어 왔다^{[4],[5]}.

ITS 전자파 환경 개선을 위한 전자 흡수체에서 요구되는 가장 중요한 성질은 경사 입사된 TE(Transverse Electric)와 TM(Transverse Magnetic) 양 편파에 대해서 낮은 반사 손실을 보이는 것이다. 수직 입사된 전자파에 대한 전자 흡수체의 설계와 특성 해석에 관한 연구는 지금까지 많이 행해져 왔으나^[6], 경사 입사 편파 특성에 관한 연구는 구조 설계 또는 재료에 관련하여 충분히 이루어지지 못하였다. 본 논문에서는 ITS 운용 주파수에 초점을 맞추어, 경사 입사된 전파의 낮은 반사 손실을 목표로 2층형의 전자 흡수체를 설계하였다. 카본 블랙-고무와 순철 압분체-고무로 구성된 2층형 복합 재료에서 TE, TM 양 편파에 대한 경사 입사 특성 해석을 통하여 ITS의 전자파 환경 개선에 적합한 전자 흡수체를 구현할 수 있었다.

II. 흡수체 설계

N 층으로 이루어진 전자파 흡수 구조를 Fig. 1(a)에 나타내었다. 각 층은 두께 d 와 복소비 유전율 ($\epsilon_r = \epsilon_r' - \epsilon_r''$), 복소비 투자율($\mu_r = \mu_r' - \mu_r''$)로 특징지어진다. 입사 매질은 자유공간이고, 배면층(그라운드 층)은 완전 도체로 구성된다. 이러한 다층 구조에 대한 전송 선로를 Fig. 1(b)에 나타내었다. n 층 표면에서의 입력 임피던스 $Z_{in(n)}$ 은 n 번째 층에서 배면층(부하 임피던스 $Z_L=0$)까지 포함하는 다층 구조의 입력 임피던스이다. 그러므로 $Z_{in(N)}$ 은 N 개의 층으로 이루어진 구조의 총 입력 임피던스가 된다. 입력 임피던스 $Z_{in(N)}$ 은 다음과 같은 순환 공식에 의해 계산할 수 있다.

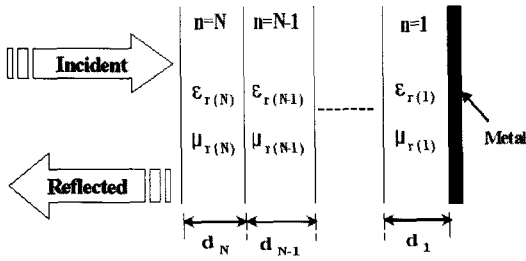
$$Z_{in(1)} = Z_1 \tanh \nu_1 d_1 \tag{1}$$

$$Z_{in(n)} = Z_n \frac{Z_{in(n-1)} + Z_n \tanh \nu_n d_n}{Z_n + Z_{in(n-1)} \tanh \nu_n d_n} \tag{2}$$

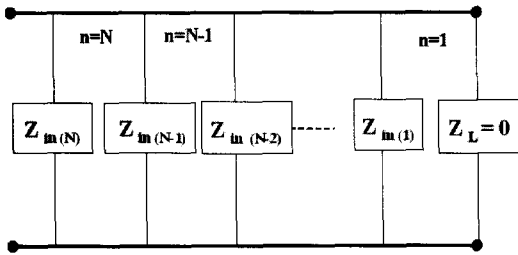
$$Z_{in(N)} = Z_N \frac{Z_{in(N-1)} + Z_N \tanh \nu_N d_N}{Z_N + Z_{in(N-1)} \tanh \nu_N d_N} \tag{3}$$

여기서 Z_n 과 ν_n 은 각각 n 층에서의 특성 임피던스와 전파 상수이다.

평면파의 경사 입사의 경우, Fig. 2에 나타낸 TE와 TM의 두 편파를 고려해야 한다. TE 편파는 전계가



(a) 모식도
(a) Schematic description



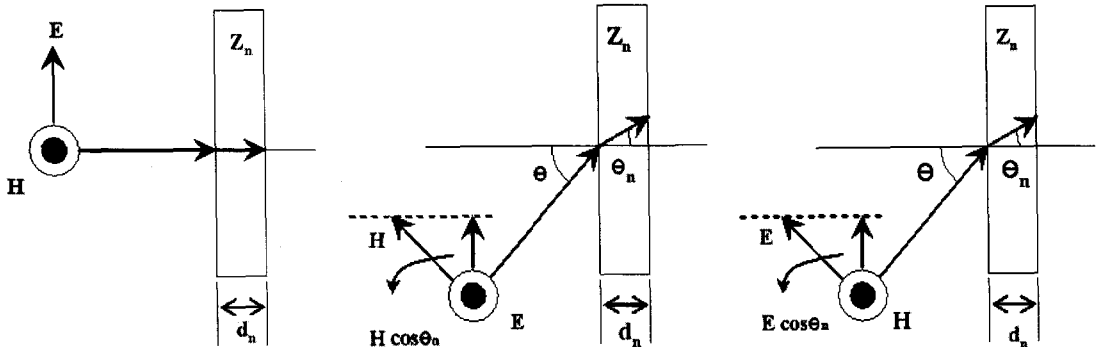
(b) 전송 선로
(b) Analogous transmission line

그림 1. N 층 전파 흡수체
Fig. 1. N-layered microwave absorber.

입사면에 대해 수직인 경우이고, TM 편파는 전계가 입사면 상에 위치한 경우이다. n층에서의 TE와 TM 편파의 특성 임피던스는 다음과 같은 식으로 주어진다(각각 $Z_n(TE)$ 와 $Z_n(TM)$ 으로 나타내었다).

$$Z_n(TE) = \frac{E}{H \cos \theta_n} = \frac{Z_0 \sqrt{\mu_r(n)/\epsilon_r(n)}}{\cos \theta_n} \quad (4)$$

$$Z_n(TM) = \frac{E \cos \theta_n}{H} = Z_0 \sqrt{\mu_r(n)/\epsilon_r(n)} \cos \theta_n \quad (5)$$



(a) TEM (b) TE (c) TM

그림 2. 입사 평면파의 편파
Fig. 2. Incidence of plane wave with polarizations.

여기서 Z_0 는 자유 공간의 파동 임피던스($=377 \Omega$)이고, θ_n 는 굴절각이다. 스넬의 법칙에 따르면 θ_n 은 입사각 θ 와 다음과 같은 관계를 갖는다.

$$\cos \theta_n = \sqrt{1 - \frac{\sin^2 \theta}{\epsilon_r(n)\mu_r(n)}} \quad (6)$$

경사 입사된 전파의 n 층에서 전파 상수는 다음과 같다.

$$\nu_n = j \frac{2\pi}{\lambda_0} \sqrt{\epsilon_r(n)\mu_r(n)} \cos \theta_n \quad (7)$$

여기서 λ_0 는 자유공간에서의 파장이다.

각 층의 특성 임피던스와 전파상수를 대입하여 N 번째 층 표면의 입력 임피던스 $Z_{in(N)}$ 을 구하면, 입사각 θ 의 함수로 다층형 매질의 반사계수(Γ)를 계산할 수 있다. TE, TM 편파에 대한 반사계수는 각각 식 (8)과 식 (9)로 주어진다.

$$\Gamma(TE) = \frac{Z_{in(N)} - Z_0 / \cos \theta}{Z_{in(N)} + Z_0 / \cos \theta} \quad (8)$$

$$\Gamma(TM) = \frac{Z_{in(N)} - Z_0 \cos \theta}{Z_{in(N)} + Z_0 \cos \theta} \quad (9)$$

데시벨(dB)로 표현되는 반사 손실은 식 (10)과 같다.

$$\text{Reflection loss} = 20 \log |\Gamma| \quad (10)$$

III. 실험 방법

3-1 구성 재료 및 복합체 제조

본 실험에 사용된 전파 흡수체는 임피던스 정합을

유도하기 위한 저유전율 재료의 표면층과 GHz 대역에서 높은 자기 손실의 특성을 가진 흡수층으로 구성된 2층형의 복합 재료 판재이다. 표면층은 카본블랙(20 wt%)과 가황고무(80 wt%)의 혼합물로 이루어져 있다. 흡수층에 사용된 충전재는 연자성 특성을 갖는 순철 압분체(입경 $\approx 30 \mu\text{m}$, 두께 $\approx 1 \mu\text{m}$)이다. 아트리션 밀링에 의해 편상화된 분말은 지지재로 사용된 고무와 9:1의 무게 비율로 혼합되었다. 각각 제작된 복합 재료 시트를 $30 \times 30 \text{ cm}$ 의 크기로 잘라 $30 \mu\text{m}$ 폴리에틸렌 접착 필름을 사용해 가압 성형을 통해 적층하였다.

3-2 재료정수 및 반사 손실 측정

복소비 유전율과 복소비 투자율은 동축관을 이용한 반사/투과법(S-parameter 법)에 의해 측정하였다^[7]. 제작된 sheet로부터 링 형태의 샘플(내경 3 mm, 외경 7 mm)을 채취하여 샘플 홀더에 장착한 다음, 반사계수 및 투과계수를 측정하고, 이로부터 복소비 유전율 및 복소비 투자율을 계산하였다.

반사 전력은 Fig. 3과 같은 자유공간법에 의해 측정되었다. 자유공간 측정 시스템은 한 쌍의 혼 안테나와 샘플 홀더, HP8510C 회로망 분석기, 그리고 컴퓨터로 구성되어 있다. 측정 샘플의 표준 크기는 $30 \times 30 \text{ cm}$ 이다. 반사 손실 측정은 TE, TM 양 편파에 대해서 입사각을 변화시켜 주며 행하였다. 경사 입사된 전파의 반사 손실 측정시 TE, TM 편파를 고려해야 하는데, 이는 각 모드에 적합하게 송신 안테나와 수신 안테나의 방향을 동일하게 90° 씩 회전시켜 측정하였다. 입사 각도에 따라 반사 손실을 측정하기 전에 송·수신 안테나의 전파 회절 효과를 보정하기 위하여 모든 각도에 대해 calibration을 행하였다^[8].

IV. 결과 및 고찰

4-1 복소비 유전율 및 복소비 투자율

Fig. 4는 표면층(카본 블랙 복합재)과 흡수층(순철 압분체 복합재)의 복소비 유전율($\epsilon_r = \epsilon_r' - j\epsilon_r''$)과 복소비 투자율($\mu_r = \mu_r' - j\mu_r''$)의 주파수 분산 특성이다. 표면층의 복소비 유전율은 Fig. 4(a)와 같이 $\epsilon_r' = 4.6$ $\epsilon_r'' = 0.3$ 의 값을 보인다. 카본 블랙은

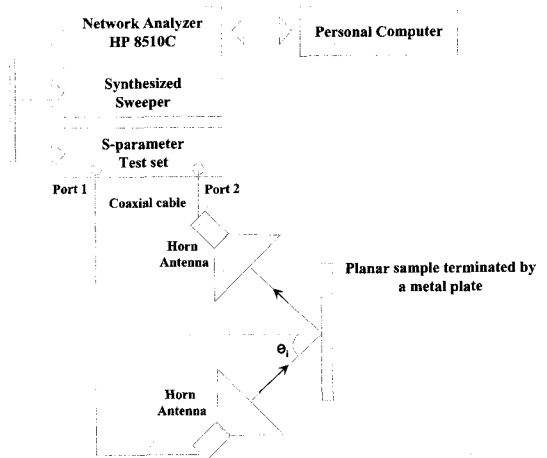


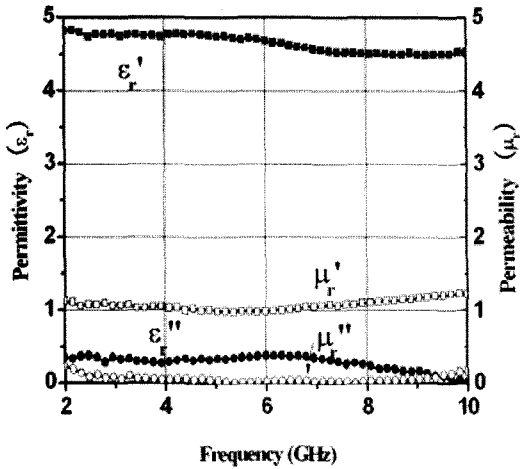
그림 3. 자유공간법에 의한 반사 계수 측정

Fig. 3. Free space measurement system for reflection coefficient.

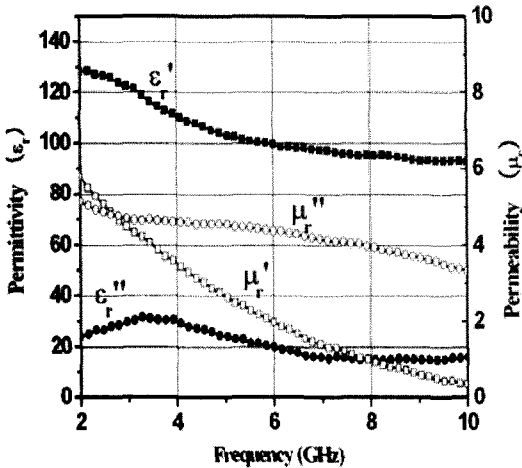
비자성체이므로 복소비 투자율은 $\mu_r' = 1$, $\mu_r'' = 0$ 의 값을 갖는다. 흡수층에 사용된 복합 재료(고무 매트릭스에 혼입된 순철 압분체)는 Fig. 4(b)와 같이 높은 투자율과 높은 유전율이 측정되었다. 순철 압분체의 강자성 공명으로 인해 μ_r' 은 주파수가 높아짐에 따라 감소하고, 2~10 GHz 대역에 걸쳐 자기 손실 계수 $\tan \delta > 1$ 의 높은 자기 손실 특성을 보인다^[9]. 복소비 유전율 또한 높은 유전상수($\epsilon_r' = 110$)와 유전손실($\epsilon_r'' = 20$)을 보이는데, 이는 절연체 지지체에 분산되어 있는 금속 분말 간의 공간 전하 분극에 기인한다.

4-2 전파 흡수 특성

Fig. 5(a)는 금속판 위에 순철 압분체 복합재를 1 mm 두께로 단층 설계했을 경우(흡수층만 존재) 주파수 2~10 GHz 범위에서 수직 입사 평면파에 대한 반사 손실 결과를 보여주고 있다. -1 dB 이상의 반사 손실을 보여 대부분의 전파가 반사됨을 알 수 있다. 순철 압분체 복합재의 높은 유전율과 투자율에 의해 표면에서 자유공간의 파동 임피던스와 정합이 이루어지지 않기 때문에 전파의 반사율이 매우 크다. 따라서 반사파를 최소화하기 위한 저유전율의 표면층 즉, 임피던스 정합층이 요구된다. Fig. 5(b)는 순철 압분체 복합재 위에 카본 블랙 복합재(두께 7 mm)를 표면층으로 부착시킨 2층형 흡수체의 수직 입



(a) 카본 블랙
(a) Carbon black



(b) 철 압분체
(b) Iron flake particles

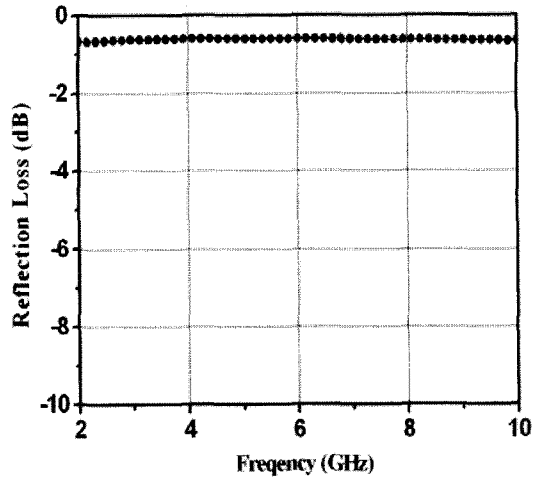
그림 4. 고무 복합체의 복소비 투자율 및 복소비 유전율

Fig. 4. Complex permittivity and permeability determined in the rubber composites.

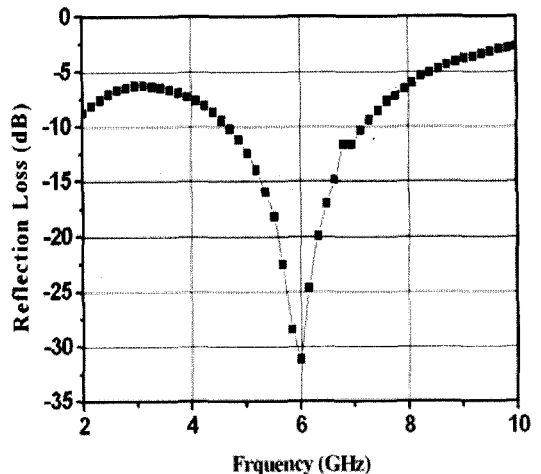
사 평면파에 대한 반사 손실 결과이다. 6 GHz에서 -30 dB 수준의 낮은 반사 손실 값을 보여 임피던스 정합이 일어남을 볼 수 있다.

Fig. 6은 임피던스 정합을 유도한 2층형 구조에서 TE, TM 편파에 대해 경사 입사된 전파 흡수능 결과이다. TE, TM 편파 모두 입사각에 따라 반사 손실이 증가한다. 계산치와 측정치 모두 입사각 0~55°에서 -10 dB(전력 흡수율 90%) 이하의 낮은 반사 손실

값을 보여준다. 측정치와 계산치의 결과가 약간의 차이를 보이고 있다. 전력 반사율로 환산했을 때, TE 편파의 경우 측정치는 계산치보다 약 3% 정도 낮게 측정되었고, TM 편파의 경우 측정치는 계산치는 약 3% 정도 높게 측정되었다. 이와 같은 차이는 재료 정수의 측정 오차에 기인하는 것으로 사료된다. 투과/반사법에 의한 재료 정수의 측정 오차는 최대 ±3% 범위로 보고되고 있다^[10].



(a) 철 압분체 단층 흡수체
(a) Single layer of iron flake composite



(b) 카본 블랙/철 압분체 2층 흡수체
(b) Two-layer composites laminate of carbon black and iron flake particles.

그림 5. 반사 손실 측정 결과

Fig. 5. Reflection loss determined incidence.

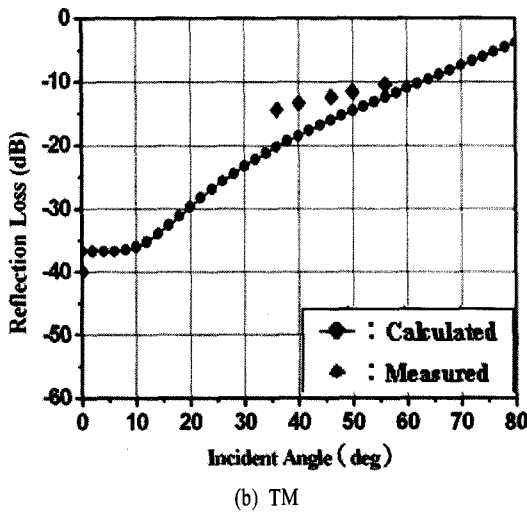
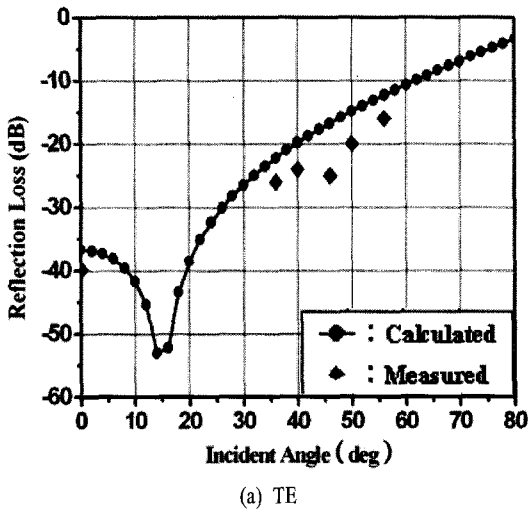


그림 6. 입사각에 따른 2층형 흡수체의 반사 손실
 Fig. 6. Reflection loss determined in two-layered composite laminate at oblique incidence.

V. 결 론

ITS 운용 중 전파의 난반사에 의해 발생할 수 있는 전자파 간섭 및 불요 통신 영역 확대 등의 전자파 환경 문제 개선을 위한 전파 흡수체를 설계, 제작하였다. ITS 운용 주파수인 5.8 GHz에 초점을 맞추어 광각 경사 입사 특성에 적합하도록 2층형의 전파 흡수체 구조를 설계하였다. 흡수층에 높은 자기 손실을 보이는 순철 압분체 복합재와 임피던스 정합층에 낮은 유전상수를 가진 카본 블랙 복합재를 선택하여 2층형 흡수체를 제작하였다. TE, TM 양 편파에 대해

입사각 55°에 이르기까지 -10 dB 이하의 반사 손실을 갖는 광각 경사 입사 전파 흡수체가 설계되었다. 자유공간법에 의해 측정된 실측치는 설계치와 ±3 % 범위 내에서 일치하여 ITS 전자파 환경 개선용으로 적합한 광사 입사 전파 흡수체를 제안할 수 있었다.

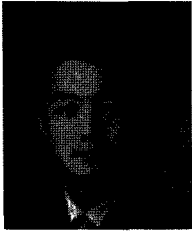
참 고 문 헌

- [1] 배창호, 정희창, 김영주, 장호성, "ETC 시스템에서의 마이크로파 전파 특성", 한국통신학회논문지, 25(5A), pp. 696-670, 2000년.
- [2] 배창호, 정희창, 김영주, 장호성, "능동방식 ETC 시스템을 이용한 마이크로파 전파 모델 연구", 한국해양정보통신학회 '99 추계종합학술대회지, 3(2), pp. 101-105, 1999년.
- [3] M. Toyota, O. Hashimoto, and M. Wakai, "Study on radio transmission for 5.8 GHz DSRC", *Technical Report of IEICE Japan, EMCJ 2003-22*, pp. 1-5, 2003.
- [4] R. K. Pokharel, M. Toyota, and O. Hashimoto, "Analysis on effectiveness of wave absorbers to improve DSRC electromagnetic environment on express highway", *IEEE Trans. MTT*, vol. 53, no. 9, pp. 2726- 2731, 2005.
- [5] M. Hanazawa, O. Hashimoto, "Study of broad type wave absorber using resistive-film for ETC", *Transaction of IEICE Japan*, I85-B(5), pp. 867-870, 2002.
- [6] E. F. Knott, J. F. Schaeffer, and M. T. Tuley, *Radar Cross-section Its Prediction, Measurement and Reduction*, Artech House, 1985.
- [7] S. S. Kim, S. B. Jo, K. I. Gueon, K. K. Choi, J. M. Kim, and K. S. Churn, "Complex permeability and permittivity and microwave absorption of ferrite-rubber composite in X-band frequencies", *IEEE Trans. Mag.*, vol. 26, no. 6, pp. 5462-5464, 1991.
- [8] I. S. Seo, W. S. Chin, and D. G. Lee, "Characterization of electromagnetic properties of polymeric composite materials with free space method", *Compo. Struct.*, vol. 66, no. 1-4, pp. 533-542, 2004.
- [9] S. S. Kim, S. T. Kim, Y. C. Yoon, and K. S. Lee,

"Magnetic, dielectric and microwave absorbing properties of iron particles dispersed in rubber matrix in GHz frequencies", *J. Appl. Phys.*, vol. 97, no. 10, pp. 10F905 1-3, 2005.

[10] Hewlett Packard Production Note No. 8510-3: *Measuring Dielectric Constant with the HP 8510 Network Analyzer.*

김 재 응



2005년 2월: 충북대학교 재료공학과 (공학사)

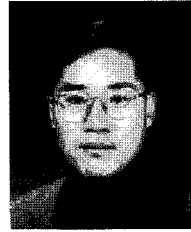
2007년 2월: 충북대학교 재료공학과 (공학석사)

2007년 3월~현재: 일진전기(주) 근무

[주 관심분야] 전자파 흡수/차폐재,

고주파 자성/유전체 재료

김 성 수



1978년 2월: 서울대학교 금속공학과 (공학사)

1980년 2월: 한국과학기술원 재료공학과 (공학석사)

1983년 8월: 한국과학기술원 재료공학과 (공학박사)

1984년 3월~1992년 2월: 국방과학

연구소 선임연구원

1987년 10월~1988년 9월: 펜실베이니아주립대 Post-Doc.

2003년 1월~2003년 12월: 동경공대 객원교수

1992년~현재: 충북대학교 신소재공학과 교수

[주 관심분야] 전자파 흡수/차폐재, 고주파 자성/유전체 재료