

재료의 전자파 특성 측정방법(II)

—마이크로파 대역의 전자파 차폐효과 측정법—

정연춘 · 윤호규 · 김환건

1. 서론

최근의 전자파장해 규제 주파수의 상한은 기존의 1 GHz에서부터 점차 상향되고 있으며, 현재 군사규격에서는 40 GHz 까지 규정하고 있다. 흔히 상용규격에서는 10 GHz 정도를 상한으로 보고 있는데, 앞으로 계속해서 확대될 것으로 보인다. 이는 무선 서비스가 수십 GHz 대역으로 확장되는 것과 유관하기 때문이다. 따라서 전자파장해 대책에 사용되는 전자파 차폐 및 흡수 부품의 특성도 마이크로파 대역으로 확장되어야 한다. 이러한 주파수대역에서는 기존의 1 GHz 이하의 주파수에서 적용되던 측정 기법을 그대로 적용하기 어렵고, 따라서 새로운 형태의 측정 기법과 측정 치수가 제안되어야 한다.

본 고에서는 현재 산업체에서 널리 사용되고 있는

ASTM D4935-99에¹ 근거한 플랜지형 동축 전송선 측정 치구의 물리적 치수 변경을 통한 사용주파수 확장 및 이중쇄기형 도파관-동축선 어댑터를 이용한 마이크로파 대역에서의 전자파 차폐효과에 대해 소개하였다.



윤호규

1984 고려대학교 재료공학과(B.S.)
1989 고려대학교 재료공학과(M.S.)
1993 일본 나고야 공업대학(Ph.D.)
1993~ 제일모직(주) 화성연구소
1996 선임연구원
1996~ 고려대학교 신소재공학부 교수
현재



정연춘

1984 경북대학교 물리학과(B.S.)
1986 경북대학교 물리학과(M.S.)
1999 충남대학교 전자공학과(Ph.D.)
1985~ 한국표준과학연구원 전자기환경
2001 그룹(책임연구원, 그룹장)
2000~ Univ. of York, Visiting
2001 Academics
2001~ 익스펜전자(주) 중앙연구소장
2002 (부사장)
2002~ 서경대학교 정보통신공학과
현재 교수



김환건

1983 서울대학교 화학교육과(B.S.)
1985 한국과학기술원(M.S.)
1987 한국과학기술원(Ph.D.)
1987~ 삼성종합기술원 신소재응용연구소
1993 수석연구원
1993~ 제일모직 화성연구소 수석연구원
1995
1995~ 서경대학교 응용화학부 교수
현재

Measuring Electromagnetic Wave Properties of Materials(II)

서경대학교 이공대학 정보통신공학과(Yeon-Choon Chung, Department of Information and Communication Engineering, Seokyeong University, 16-1 Jungneung-dong, Sungbuk-ku, Seoul 136-704, Korea)

e-mail : ycchung@skuniv.ac.kr

고려대학교 공과대학 신소재공학부(Ho Gyu Yoon, Department of Materials Science and Engineering, Korea University, 5-1 Anam-dong, Seongbuk-gu, Seoul 136-713, Korea)

서경대학교 이공대학 응용화학부(Whan Gun Kim, Department of Applied Chemistry, Seokyeong University, 16-1 Jungneung-dong, Sungbuk-ku, Seoul 136-704, Korea)

2. 본론

2.1 ASTM D4935-99 측정 치구의 사용주파수 확장

동축 전송선(coaxial line)의 차단 주파수에서의 파장 λ_c 는 다음과 같이 주어진다.^{2,3}

$$\lambda_c \equiv \frac{\pi}{2}(D+d) \quad (1)$$

여기에서, D =플랜지의 외경, d =플랜지의 내경. 식 (1)로부터 동축 전송선 측정 치구의 차단 주파수는 단순하게 동축선 구조의 물리적인 치수에 의해 결정되며, 따라서 동축 전송선 구조의 치수를 줄임으로서 차단 주파수를 높일 수 있음을 알수 있다. 기존의 동축 전송선 측정 치구의 물리적 치수를 1/2의 비율로 줄이면 사용 주파수를 2배 증가시킬 수 있다.

그림 1은 기존의 ASTM D4935-99 측정 치구의 물리적 치수를 1/2의 비율로 줄인 새로운 형태의 플랜지형 동축 전송선 측정 치구로서 $D=7.6$ cm, $d=3.3$ cm 이다. 이러한 측정 치구의 특성 임피던스=50.05 Ω 으로서 50 Ω 측정 시스템에 쉽게 적용할 수 있다.

새로 제작된 플랜지형 동축 전송선 측정 치구의 동작

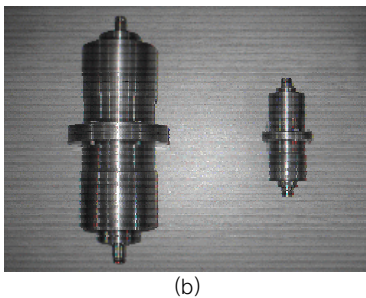
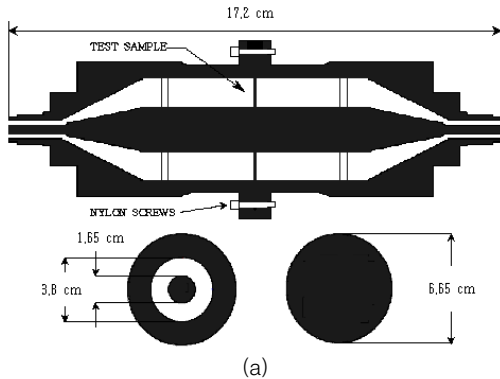


그림 1. 플랜지형 동축 전송선 측정 치구: (a) 사용 주파수대역이 확장된 측정 치구의 물리적 치수, (b) 기존의 측정 치구와의 비교.

특성을 확인하기 위해 도전성 실리콘 차폐재의 원역장 전자파 차폐효과를 3차원 전자장 수치해석 소프트웨어 HFSS를 이용하여 시뮬레이션하고, 또한 회로망분석기를 이용한 측정 결과와 비교하였다. **표 1**은 시뮬레이션에 사용된 물성 데이터를 나타낸 것으로 정확한 물성데이터의 측정이 불가능하여 상대적으로 적은 영향을 미치는 비유전율과 비투자율은 모두 1로 설정하였고, 도전율은 4-probe 방식으로 측정된 결과를 이용하였다. 4-probe 방식의 도전율은 시편의 표면 저항을 측정하고, 시편의 모양(원 또는 직사각형)과 면적을 고려하여 계산하면 쉽게 결정할 수 있다.

플랜지형 동축 전송선 측정 치구에서 전자파 차폐효과 측정은 **그림 2**에 보인 두 개의 시편, 즉 기준(re-reference) 시편과 부하(load) 시편에 대해 동일한 송신 전력에 대한 수신 전력의 차이를 구하는 과정이다.

$$\begin{aligned} SE_{dB} &= 10 \log \left(\frac{P_r}{P_r} \right) \\ &= 10 P_r - 10 \log P_r \\ &= \text{투과손실}(S_{21}(\text{Reference})) - \text{투과손실}(S_{21}(\text{Load})) \quad (2) \end{aligned}$$

측정에 사용된 도전성 실리콘 차폐재는 필러의 분포 상태와 함량에 따라 약간씩 다른 특성을 가졌다. 따라서 시편의 종류에 따른 측정 오차를 줄이기 위해 먼저 ASTM D4935 측정 치구로 측정하고, 측정에 사용된 부하 시편의 중심부를 잘라 새로운 측정 치구의 부하 시편으로 사용하였다. 또한 측정 결과를 Schelkunoff의 전자파 차폐효과 이론과 비교하였다.

전자파 차폐효과는 식 (3)으로 표현된다. 여기에서

표 1. 시뮬레이션에서 사용된 시편의 두께와 물성 데이터

	두께	비유전율	비투자율	도전율(S/m)
시편 1	1 mm	1	1	325.37
시편 2	2 mm	1	1	854.18



그림 2. 측정에 사용되는 시편의 모양; (a) 기준 시편, (b) 부하 시편.

R_{dB} 는 임피던스 부정합에 의한 반사 손실이고, A_{dB} 는 전자파가 시편을 통과할 때의 흡수 손실을 나타내며, R_{dB} 는 다중 반사 손실을 나타낸다. 다중 반사 손실은 흡수손실이 15 dB 이상일 경우 무시될 수 있다.⁵⁻⁷

$$SE_{dB} = R_{dB} + A_{dB} + B_{dB} \quad (3)$$

$$\text{여기에서, } R_{dB} = 108 + 10 \log \frac{\sigma r}{f_{MHz} \mu_r},$$

$$A_{dB} = 131.4 t \text{ mm} \sqrt{f_{MHz} \mu_r \sigma_r},$$

$$B_{dB} = 20 \log(1 - e^{-30.3 \frac{t}{\text{mm}} \sqrt{f_{MHz} \mu_r \sigma_r}})$$

여기에서, t_{mm} = 차폐재료의 두께(mm)

f_{MHz} = 입사 전자파의 주파수(MHz)

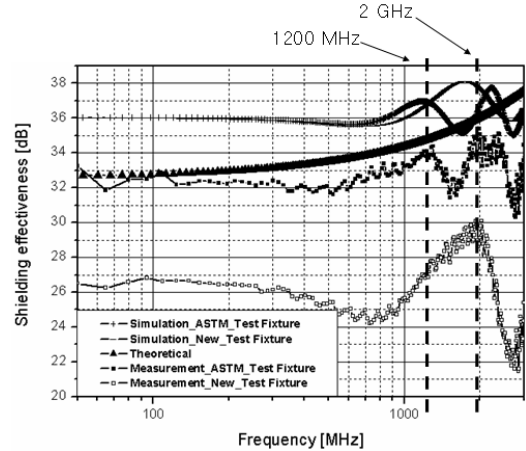
μ_r = 재료의 비투자율

σ_r = 재료의 비전기전도도

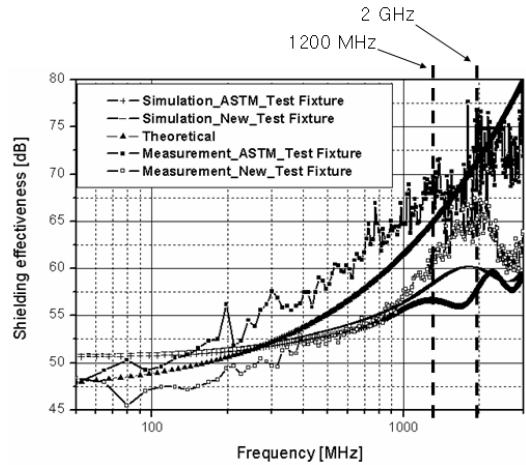
각 시편에 대한 측정 결과와 시뮬레이션 결과, 그리고 이론값을 비교한 결과를 **그림 3**에 보였다. 여기에서, ASTM Test Fixture는 ASTM D4935 규격의 측정 치구, New Test Fixture는 물리적 치수를 줄인 새로운 측정 치구를 나타낸다. 또한 이론값은 측정된 도전율과 가정한 유전율과 투자율 값을 이용하여 식 (3)으로 계산한 결과이다.

이론적으로 계산된 전자파 차폐효과는 주파수가 증가하면 흡수 손실의 영향이 커짐에 따라 지수 함수적인 형태로 증가하게 된다. 따라서 **그림 3**에 보인 측정 결과와 시뮬레이션 결과에서 주파수가 증가함에 따라 전자파 차폐효과가 증가하다가 갑자기 떨어지는 것을 확인할 수 있는데, 이러한 현상은 측정 치구의 고차 모드 공진에 기인하는 것이다. 이러한 주파수 이상에서는 측정 결과를 이상적인 원역장 차폐효과로 볼 수 없으며, 따라서 각각의 사용 주파수 상한으로 볼 수 있다. 즉, ASTM D4935 규격의 측정 치구는 약 1.2 GHz, 물리적 치수를 줄인 새로운 측정 치구는 약 2.0 GHz의 사용 주파수 상한을 가짐을 알 수 있다.

또한 전자파 차폐효과에 대한 Shelkunoff 이론은 금속 재료에 대해서는 상당히 정확하다고 알려져 있다. **그림 3**에서 볼 수 있는 것처럼 도전율이 상대적으로 낮은 물질에 대해서는 약간의 오차가 존재하지만 도전율이 커짐에 따라서 이론값과 측정 결과가 거의 일치함을 알 수 있다. 시뮬레이션 결과와 측정 결과의 차이는 물성 데이터의 부정확성, 측정 시편의 비균질성, 측정 치구와 시편 사이의 기생 임피던스의 존재 등에 기인한다.



(a)



(b)

그림 3. 전자파 차폐효과의 측정 및 시뮬레이션 결과와 이론값의 비교; (a) 시편 1, (b) 시편 2.

2.2 이중쇄기형 도파관을 이용한 전기장 차폐효과 측정

근역장 차폐효과 측정을 위해서 Dual TEM Cell⁸ 방법이 많이 사용되고 있다. 그러나 이러한 측정 치구를 사용하여 마이크로파 대역에서의 전기장 차폐효과를 측정할 수 없다. 따라서 여기에서는 저자가 제안한 이중쇄기형 도파관-동축선 어댑터(double-ridged waveguide to coaxial adapter)를 사용한 새로운 방법을 소개한다. **그림 4**는 이중쇄기형 도파관-동축선 어댑터와 측정에 사용되는 기준 시편과 부하 시편의 형태를 나타낸 것이다. 여기에서, 이중쇄기형 도파관을 사용하면 표준 도파관보다 넓은 주파수대역에서 측정이 가능한 장점이 있다. 이러한 측정 치구를 이용한 전기장 차폐효과 측정은 플랜지형 동축선 측정 치구를

이용한 방법과 마찬가지로 두 시편에 대해 동일한 송신 출력에 대한 수신 전력의 차이를 평가하는 과정이다. 이러한 방법 역시, 이중쇄기형 도파관-동축선 어댑터의 플랜지를 이용하여 시편을 고정하므로 기존의 측정 치구에서 시편을 치구 내로 삽입함으로써 발생하는 측정오차를 현저히 줄일 수 있고, 재현성 있는 측정 결과를 얻을 수 있는 장점을 가지고 있다.

새로 제작된 이중쇄기형 도파관-동축선 어댑터를 이용한 측정 치구의 동작 특성을 확인하기 위해 도전성 실리콘 차폐재 시편1의 전기장 차폐효과를 3차원 전자기장 수치해석 소프트웨어 HFSS를 이용하여 시뮬레이션하고, 또한 회로망 분석기를 이용한 측정 결과와 비교하였으며, 그 결과를 **그림 5**에 보였다. 여기에서, 시뮬레이션에 사용된 물성 데이터는 앞 절에서 기술한

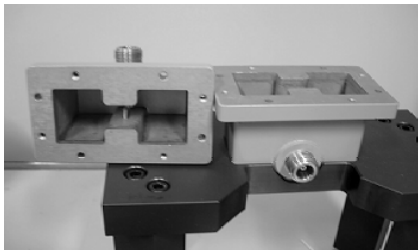
표 1과 같다. **그림 5**로부터 측정 결과와 시뮬레이션 결과가 비교적 잘 일치하고, 유사한 주파수 경향성을 가짐을 알 수 있다. 따라서 이중쇄기형 도파관-동축선 어댑터를 이용한 측정 치구를 사용하여 마이크로파 대역에서의 전기장 차폐효과를 쉽게 측정할 수 있음을 알 수 있다.

3. 결론

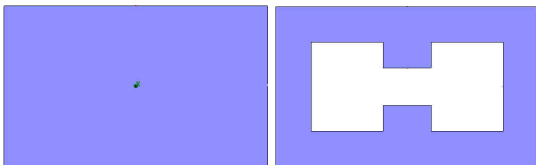
본 고에서는 1 GHz 이상의 주파수 대역에서의 전자파 차폐효과를 측정하기 위해 저자가 그동안 연구한 결과를 소개하였다. 기존의 ASTM D4935-99에 근거한 플랜지형 동축 전송선 측정 치구의 물리적 치수를 적절한 비율로 줄여서 사용 주파수를 확장할 수 있고, 또한 보다 높은 주파수대역에서는 이중쇄기형 도파관-동축선 어댑터를 이용하여 마이크로파 대역에서의 전자파 차폐효과 측정이 가능함을 보여 주었다. 이러한 결과가 산업체의 전자파 차폐효과 측정 주파수를 확장하는데 도움이 되었으면 한다.

참고문헌

1. ASTM D4935-99, "Standard Test Method for Measuring the Electromagnetic Shielding Effectiveness of Planar Materials", 1999.
2. H. Neubauer and F. R. Huber, *The Microwave Journal* (1969).
3. Mihai Badic and Mihai-Jo Marinescu, *IEEE International Symposium On Electromagnetic Compatibility*, pp. 892-895, Aug., (2001).
4. M. David Pozar, *Microwave Engineering*, John Wiley, New York, pp. 59-65 (1998).
5. S. A. Schelkunoff, *Electromagnetic Waves*, Van Nostrand, New York, pp. 303-315 (1943).
6. Richard B. Schulz, V. C. Plantz, and D. R. Brush, *IEEE Trans. Electromagnetic Compatibility*, **30**, 187, (1988).
7. 정연춘, 강태원, and 정낙삼, *한국전자과학회논문지*, **4**, 45 (1993).
8. F. Perry Wilson, and T. Mark Ma, *IEEE Trans. Electromagnetic Compatibility*, **30**, 251 (1988).



(a)



(b)

그림 4. 이중쇄기형 도파관-동축선 어댑터를 이용한 측정 치구; (a) 실제 모습, (b) 부하 시편과 기준 시편의 형태.

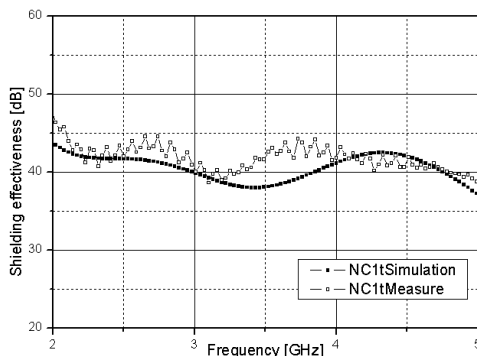


그림 5. 시편 1에 대한 전기장 차폐효과의 측정 결과와 시뮬레이션 결과의 비교.