

## 전자파차폐효과 측정시스템의 구현

### (Establishment of the Electromagnetic Shielding Effectiveness Measurement System)

정 연 춘\* · 강 태 원\* · 정 낙 삼\*\*

(Yeon Choon Chung\* · Tae Weon Kang\* · and Nak Sam Chung\*\*)

#### 요 약

재료의 전자파차폐효과는 일정한 송신전력에 대해 측정치구 내에 차폐재료가 놓여 있을 때와 없을 때에 수신되는 수신전력의 차를 측정하므로써 결정된다. 구현된 전자파차폐효과 측정시스템은 다양한 측정치구를 이용하고, 트래킹신호원, 스펙트럼분석기, 스텝감쇠기, 고주파스위치, 신호증폭기 등을 사용하였으며, 퍼스널컴퓨터에 의해 측정이 자동적으로 이루어지도록 설계되었다. 특히 고주파스위치와 쌍방향성결합기를 이용하여 한 대의 스펙트럼분석기를 사용하여 입사전력, 반사전력, 투과전력을 측정할 수 있어 재료의 전자파차폐효과 측정은 물론, 차폐 특성에 관한 분석도 가능하여 재료의 설계에도 활용될 수 있다. 구현된 측정시스템은 10 MHz~1 GHz의 주파수대역에서 120 dB 이상의 동작영역을 가지며, 각종의 복합재료의 전자파차폐효과를 효과적으로 측정할 수 있다.

#### Abstract

The shielding effectiveness of materials is determined by measuring the ratio of the incident electromagnetic power to that which passes through the material under test. The measurement system is constructed using several test fixtures, tracking generator, spectrum analyzer, step attenuator, RF switches, and amplifiers, etc.. The automation of measurements is completed using a personal computer. Especially, incident power, reflected power, and transmitted power are measured with only one spectrum analyzer using a dual directional coupler and RF switches. Therefore the system is to be used in design of shielding materials, as well as shielding effectiveness measurements. This system has dynamic range of more than 120 dB in the frequency range of 10 MHz to 1 GHz, and it can be used to measure shielding effectiveness of composite materials.

\* 한국표준과학연구원 전자기연구부

\*\* 한국표준과학연구원 기술지원부장

## I. 서 론

오늘날 전자파장해(Electromagnetic Interference /Compatibility, EMI /EMC) 문제의 해결을 위해 전기, 전자제품의 외장재로 널리 사용되고 있는 전도성 플라스틱(conductive plastics) 및 다양한 복합재료(composite materials)는 과거에 널리 사용되던 금속 재료와 달리 전기적특성을 명확히 알 수 없기 때문에 재료의 전자파 차폐효과(shielding effectiveness)를 이론적으로 예측할 수 없고, 측정에 의해서만 그 성능이 파악되는 어려움이 있다. 이에 선진국의 많은 산업체에서 전자파 차폐효과 측정법에 관심을 기울이기 시작하였고, 근래에 들어 미 국립 표준기술연구원(NIST, 구 NBS)과 재료시험협회(ASTM)에서 표준화된 시험 방법을 제안하였다.[1, 2]. 국내에서도 전자파장해검정 규칙 등이 시행됨과 더불어 다양한 차폐재료의 특성 평가에 관한 요구가 크게 증가하고 있는 실정이다.

전자파차폐 성능의 주요 측정법은 크게 두가지 방법으로 구분할 수 있다. 하나는 사용되는 측정치구(sample holder, test fixture)에 맞게 재료를 편평하고, 얇게 시편으로 제작하여 측정하는 방법이다. 이러한 방법은 재료 자체의 특성을 간편하게 평가할 수 있는 장점이 있으나, 차폐 구조물을 만들 때 포함되는 다양한 형태의 인입구 등에 의해 성능이 저하되는 것을 파악하기 어려운 단점이 있다. 다른 하나는 재료를 실제로 사용되는 구조물의 형태로 제작하여 특성을 측정하는 방법이다. 이러한 방법은 평가하고자 하는 재료를 사용하여 최종 구조물을 근사적으로 제작하여 평가하기 때문에 실제 상황에 가장 근접하는 측정결과를 얻을 수 있는 장점이 있지만, 제품의 외장 구조물의 설계 단계에서 사용할 예정의 모든 재료에 대해 구조물을 만들어야 하고, 구조물의 형태를 변경시킬 때 다시 모든 재료에 대해 구조물을 만들어야 하는 단점이 있다[3].

효과적인 전자파 차폐효과를 얻기 위해서는 먼저 다양한 차폐재료의 특성을 간편한 방법으로 평가하여 재료의 사용 우선순위를 결정한 다음, 적절한 전자파 이론을 통해 다양한 구조에 의한 전자파차폐 성능 저하를 예측하는 것이 바람직한 것으로 판단된다. 본 논문에서

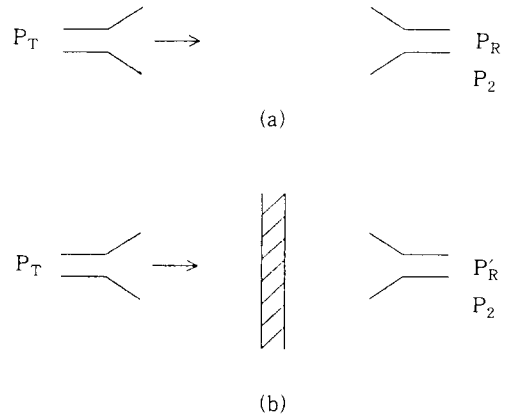
는 재료의 전자파 차폐효과를 평가할 수 있는 측정시스템의 구현에 대해 설명하고, 제작된 측정시스템의 동작 특성 및 측정오차 등에 관해 살펴보고자 한다.

## II. 전자파 차폐효과 측정시스템

재료의 전자파 차폐효과는 [그림 1]에서 볼 수 있는 것처럼 입사하는 전자파에 대해 재료 입사면에서의 임피던스 부정합에 의한 반사손실(reflection loss)과 투과하는 동안 일어나는 투과손실(penetration loss)의 합과 재료 양쪽 면에서의 임피던스 부정합에 의한 다중 반사손실 보정(Multi-reflection correction)에 의해 결정되며, 일정한 입사전력( $P_1$ )에 대해 시편을 통과해 수신되는 수신전력( $P_2$ )의 비로서 정의된다[4, 5]. :

$$S.E. (dB) = 10 \log (P_1 / P_2).$$

따라서 일정한 입사전력에 대해 측정치구에 시험하고자 하는 재료를 설치하였을 때와 그렇지 않을 때의 수신전력의 차, 즉 삽입손실을 측정하므로써 쉽게 측정할 수 있다.



[그림 1] 재료의 전자파차폐효과

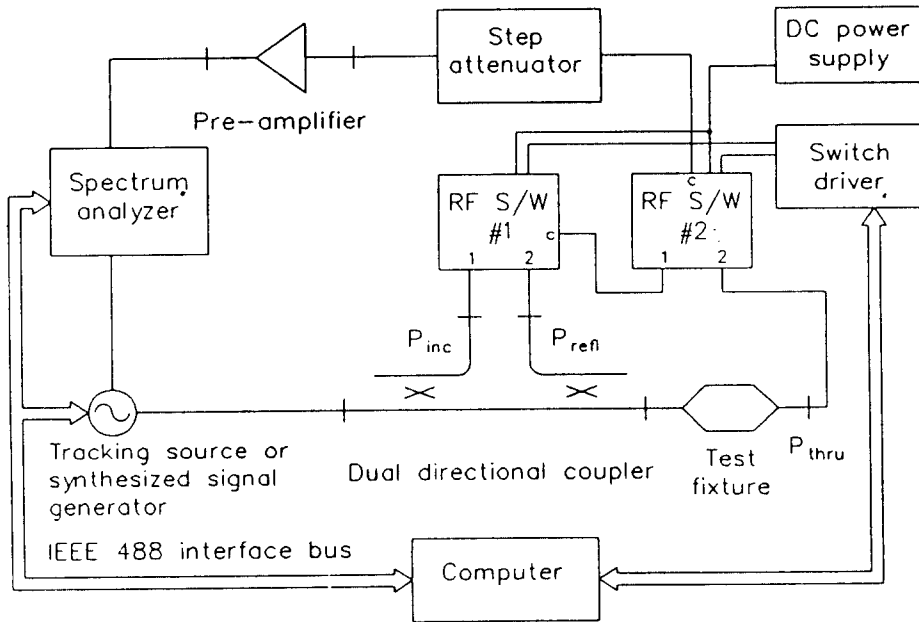
[Fig. 1] Electromagnetic shielding effectiveness of materials.

이러한 전자파차폐효과는 측정에 사용되는 측정치구의 기하학적 구조와 시편의 위치에 의해 근역장 및 원역장 차폐효과로 구분되어 결정되며, 근역장 차폐효과

는 다시 전자파원의 특성 임피던스에 따라 전기장 차폐 효과(특성임피던스가 자유공간의 특성임피던스보다 클 경우)와 자기장 차폐효과(특성 임피던스가 자유공간의 특성임피던스보다 작을 경우)로 나누어 생각할 수 있다. 따라서 평가에 사용되는 측정치구의 기하학적 구조에 의해 그것이 근역장 평가인지, 아니면 원역장 평가인지가 결정된다. 복사되는 전자파원과 시편과의 거리가  $\lambda/2\pi$ 보다 크다면 시편은 원역장 영역에 놓여 있는 것이 되며, 이 경우 외부 전자파에 대한 피시험기기의 내성평가에 있어서 구조물 재료의 원역장 차폐효과 분석에 대개 응용된다. 그러나 전자파원과 전자파 차폐구

조물과의 거리가  $\lambda/2\pi$  보다 작다면 구조물은 근역장 영역에 놓여 있는 것이 되며, 재료의 근역장 차폐효과가 보다 중요하게 된다[6].

구현된 전자파 차폐효과 측정시스템은 [그림 2]와 같으며, 원역장 차폐효과 측정치구로서 플랜지형 동축 전송선(flanged circular coaxial transmission-line)과 근역장 차폐효과 측정치구로서 이중템셀(dual TEM cell)과 이중챔버(dual chamber)를 이용하고, 스펙트럼분석기와 트래킹신호원, 스텝감쇠기, 스위치, 신호 증폭기 등을 사용하여 구현되었다. 이러한 측정시스템은 대개 10 MHz~1 GHz의 주파수대역에서 사용



[그림 2] 전자파차폐효과 측정시스템의 블록선도

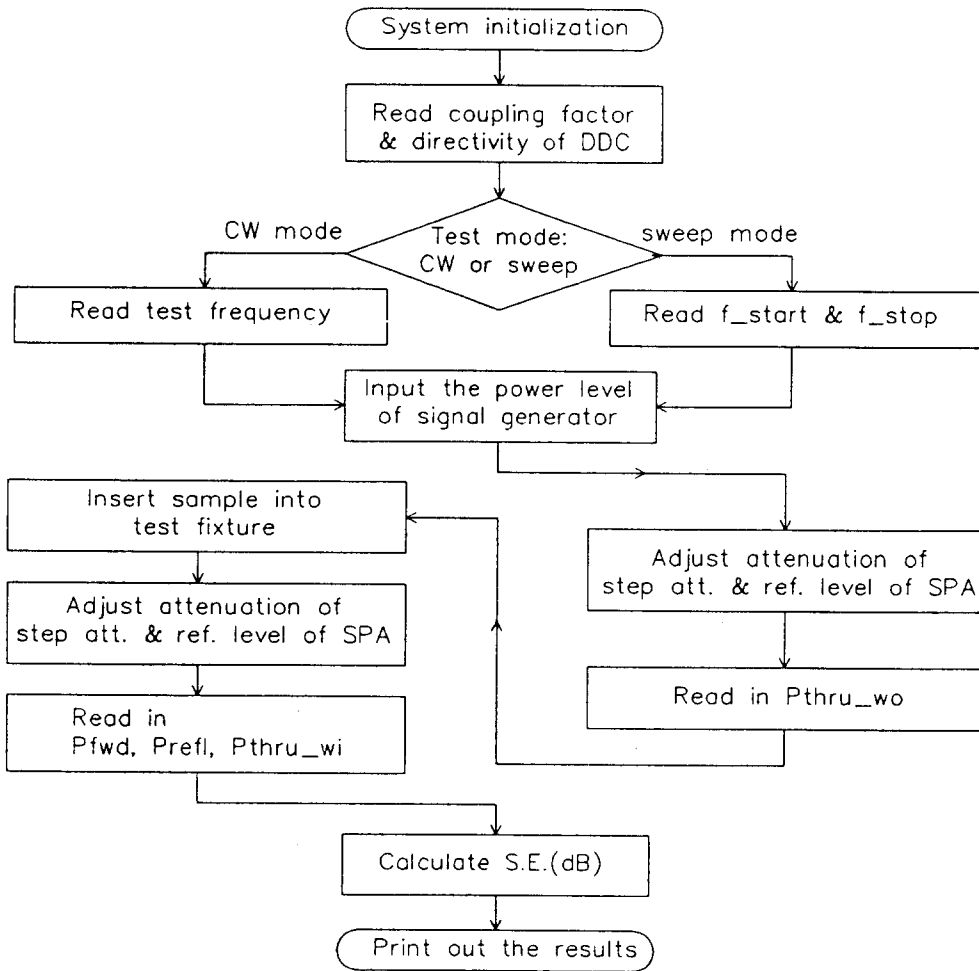
[Fig. 2] Block diagram of the S.E. measurement system.

되며, 쌍방향성 결합기를 통해 입사전력, 반사전력, 투과전력을 측정할 수 있도록 되어 있다. 특히 고주파 스위치 및 스위치 제어기를 사용하여 한개의 스펙트럼분석기로 입사전력과 반사전력, 투과전력을 모두 측정할 수 있도록 하였는데, 이러한 측정으로부터 시험중에 측정시스템의 정상동작을 확인할 수 있음은 물론, 재료의 차폐특성을 분석할 수 있게 되어 차폐재

료의 설계에도 도움을 줄 수 있다. 또한 신호발생기를 사용한 산재 주파수(discrete frequencies)에서의 차폐효과 측정뿐만 아니라, 트래킹신호원(tracking generator)을 이용한 소인주파수(swept frequencies)에서의 차폐효과를 측정할 수 있어 새로운 차폐재료로 대두되고 있는 자성손실 재료의 공진특성을 보다 쉽게 관찰할 수 있다. 측정시스템에서 가장 중요한 것은

시스템의 동작영역(dynamic range)으로서 스위치의 최대 입력전압, 스텝 감쇠기의 최대 입력전압, 수신기 전단 신호증폭기의 최대 입력전압, 수신기의 최대 입력전압, 그리고 측정치구 등의 특성에 의해 제한된다. 구성된 측정시스템은 신호 증폭기의 이득감소 레벨과 스위치의 최대 입력전압 등을 고려하여 트래킹신호원 및 신호발생기의 출력을 +13~+15 dBm으로 고정 하였으며, 수신기로 사용되는 스펙트럼분석기의 전단부에 스텝 감쇠기와 신호증폭기를 설치하여 시스템의 동작영역을 넓힐 수 있도록 설계하였다. 전자과파측

측정시스템에 포함되어 있는 장치는 HP 85645A 트래킹신호원, HP 8657A 신호발생기, HP 8566A 스펙트럼분석기, R/S RSP 스텝 감쇠기, HP 8441D 신호증폭기, HP 33311B 동축스위치, 제작된 스위치 구동제어기, Electrometrics DC 3001 쌍방향성결합기 등이며, 측정절차는 [그림 3]에 보인 흐름도의 순서에 따라 산재주파수 방법과 소인주파수 방법이 선택되어 이루어지고, 퍼스날컴퓨터에 의해 측정이 자동화되며, 측정결과를 연결된 프린터를 통해 출력시킬 수 있고, 자료저장장치에 결과를 저장할 수 있다.



[그림 3] 측정 프로그램의 흐름도

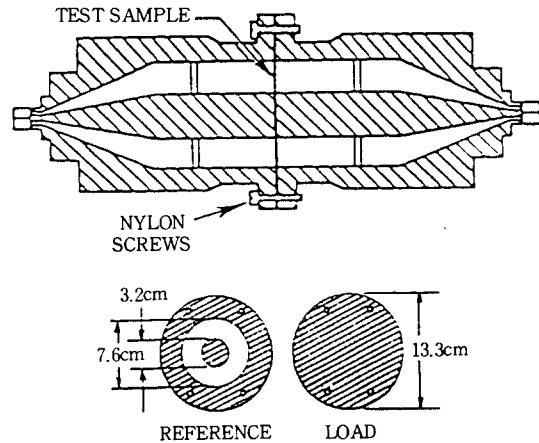
[Fig. 3] Flow chart of the S.E. test program.

### III. 측정치구의 종류와 특성

종래에 사용되었던 전형적인 전자파 차폐효과 측정법은 MIL-STD-285에 의한 송, 수신안테나 이용법이다 [7]. 이러한 방법은 측정시에 송, 수신안테나 사이에 놓이는 시편의 유한함에 의해 시편을 통과하지 않고 수신안테나에 도달하는 경로가 흔히 발생되며, 따라서 송, 수신안테나를 차폐상자로 분리, 설치하여 이러한 문제를 해결해 왔다. 그러나 이러한 방법 역시 차폐상자 내부의 반사에 의한 오차가 발생하며, 상자의 내부 벽면에 전파흡수체를 부착하여 사용하는 경우도 있으나, 이러한 방법 역시 전파흡수체의 주파수 특성과 실제 적용상의 불편함과 제작비용의 상승에 따른 문제가 있다. 따라서 오늘날에는 이러한 송, 수신안테나 이용법보다 전송선로를 이용하는 방법으로 나아가는 경향이 있다.

원역장 차폐효과 측정치구로 사용되는 플랜지형 동축전송선 측정치구는 미 국립 표준기술연구원(NIST)에서 개발되었으며, ASTM : D 4935-89의 규격에 측정치구로 채택되어 있다. [그림 4]에 보인 이러한 측정치구는 ASTM에서 '83년에 제안한 ASTM ES 7-83 규격[8]의 연속 동축선 측정치구(Circular coaxial transmission-line holer with continuous conductor)의 단점을 보완한 것으로서 내부 도체의 외경이 3.2 cm, 외부 플랜지의 외경이 13.3 cm, 내경이 7.6 cm이다. 측정시편(test specimen)의 모양이 와셔형이 아니고 디스크형으로 되어 있으며, 기준시편(reference specimen)은 양쪽의 동축 전송선이 시편을 통해 용량성 결합을 할 수 있도록 두 조각으로 되어 있고, 내외부 동축선 접촉면 사이는 비어 있다. 따라서 두 조각의 기준시편을 측정치구의 큰 동축 플랜지 사이에 끼워 기준레벨을 측정하고, 다시 디스크형의 측정시편을 측정치구 사이에 끼운 다음 수신되는 전력을 측정하게 되며, 이 둘 값의 차로부터 시편 재료의 전자파 차폐효과가 결정된다. 이때 측정치구는 시편을 통해 용량성 결합을 해야하므로 나일론 스크류를 사용하여 양쪽 부분의 플랜지를 결합하게 되며, 이러한 나일론 스크류는 금속스크류와는 다르게 접촉 임피던스의 섭동을 시편과 병렬이 되게 유지시켜 준다. 이러한 측정치구를 사용할 때의

측정 주파수대역은 1 MHz~1.8 GHz 정도인데, 주파수 하한은 측정기기의 주파수한계에 의해 제한되며, 주파수 상한은 치구의 물리적 크기에 의한 공진 주파수에 의해 제한된다[1].

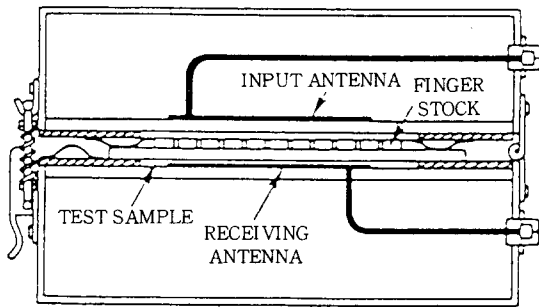


[그림 4] 플랜지형 동축 전송선 측정치구와 시편의 모양

[Fig. 4] Flanged coaxial transmission line sample holder and specimens.

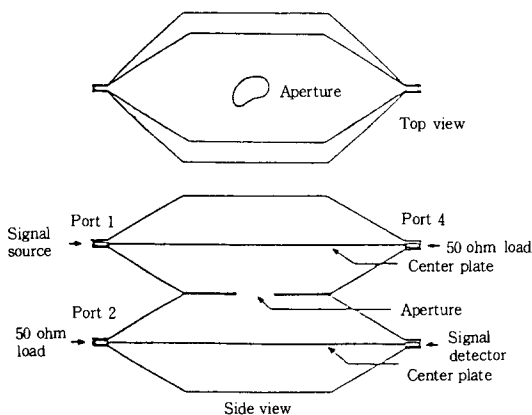
변형된 MIL-STD-285 방법으로서 ASTM ES 7-1983의 규격에서 근역장 차폐효과 측정치구로 채택하고 있는 이중챔버 측정치구가 있으며, [그림 5]에서 볼 수 있는 것처럼 신호를 송, 수신할 수 있는 안테나를 내장한 두 개의 챔버로 구성되어 있다. 시료가 없을 때 수신되는 전력  $P_1$ 과 시료를 챔버 사이에 고정시켰을 때 두 안테나 간에 전달되는 전력  $P_2$ 를 측정하므로써 재료의 전자파 차폐효과를 결정하게 된다. 이러한 측정치구는 측정이 간편하고, 빠르며, 별도의 전자파차폐실 또는 다른 측정기구물이 필요없다는 장점이 있지만 챔버의 물리적 크기에 따른 공진에 기인하여 측정결과가 주파수에 의존하는 단점을 가지고 있다. 또한 시료와 입력챔버 사이에서 가스켓 역할을 하는 스프링형 finger stock의 상태에 따라 측정결과와 반복성이 크게 좌우되는 단점도 가지고 있다.

이중챔버는 [그림 6]과 같이 이루어져 있으며, 감지 포트를 구별하여 전기장과 자기장 결합을 분리시킬 수



[그림 5] 이중챔버 측정치구  
[Fig. 5] Dual chamber test fixture.

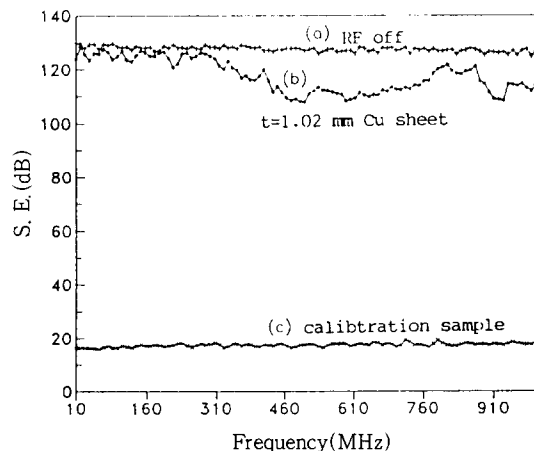
있는 유일한 치구로서 근역장과 원역장 차폐특성을 동시에 얻을 수 있다. 전기장 벡터는 시료면에 수직인 방향이고, 자기장 벡터는 시료면에 평행한 방향이므로 평면파 특성을 의사할 수 있게 되는 것이다. 이러한 측정치구는 비교적 측정이 빠르고, 시료의 크기가 작다는 장점이 있으나, 시료의 설치 상황에 따라 값이 다르고, TEM 모드가 전파되는 주파수까지만 사용할 수 있는 단점이 있다. 특히 가장 중요한 단점은 시편의 접촉저항에 따라 측정결과가 다르게 나타나는데, 복합재료의 경우 접촉저항이 재료에 따라 매우 다양하므로 값이 상당히 변화한다[9].



[그림 6] 이중템셀 측정치구  
[Fig. 6] Dual TEM cell test fixture.

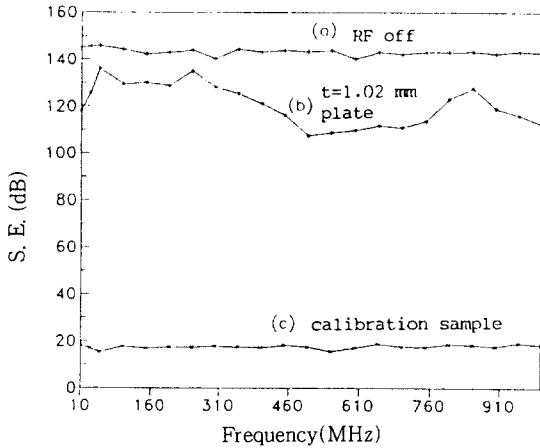
#### IV. 측정시스템의 동작영역과 측정법 비교

구현된 전자파차폐효과 측정시스템의 동작영역(dynamic range)은 사용된 측정치구에 따라 다르며, 트랙킹신호원을 이용한 소인주파수 방법(swept frequency method)과 신호발생기를 이용하여 산재주파수 방법(discrete frequency method)에 따라 각기 다르다. [그림 7]은 플랜지형 동축선 측정치구와 트랙킹신호원을 이용한 측정시스템의 동작영역을 나타낸 것이며, 그림의 (a)는 신호원의 출력을 off 하였을 때, (b)는 두께가 1.02 mm인 동판을 시편으로 사용하여 측정하였을 때, 각각 스펙트럼분석기에서 읽히는 측정값이다. 이 때 스펙트럼분석기의 분해대역폭은 10 kHz이다. 이 결과로부터 이러한 측정시스템에 의해 110 dB 이상의 동작영역이 얻어짐을 알 수 있다. 또한 그림의 (c)는 Electrometrics사에서 제공한 박막시편의 측정값으로서, 30, 1000 MHz에서 각각 16.3, 18.7 dB로 나타남을 알 수 있는데, 이 값은 제작사의 측정값 16.8, 18.0 dB와 매우 잘 일치한다. 또한 이러한 측정치구를 이용하고, 신호발생기를 사용하여 산재주파수 방법으로 측정시스템을 구성할 때(스펙트럼분석기의 분해대역폭은 3 kHz), [그림 8]에서 볼 수 있는 것처럼 110 dB 이상의 동작영



[그림 7] 소인주파수 방법에 의한 플랜지형 동축선 측정치구 시스템의 동작영역

[Fig. 7] Dynamic range of the flanged coaxial sample holder by the swept frequency method.

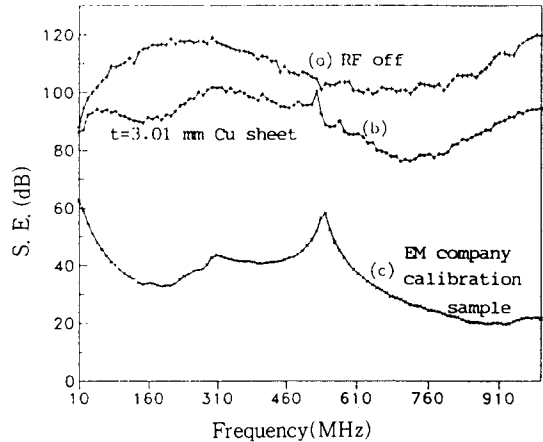


[그림 8] 산재주파수 방법에 의한 플랜지형 동축선 측정치구 시스템의 동작영역

[Fig. 8] Dynamic range of the flanged coaxial sample holder by the discrete frequency method.

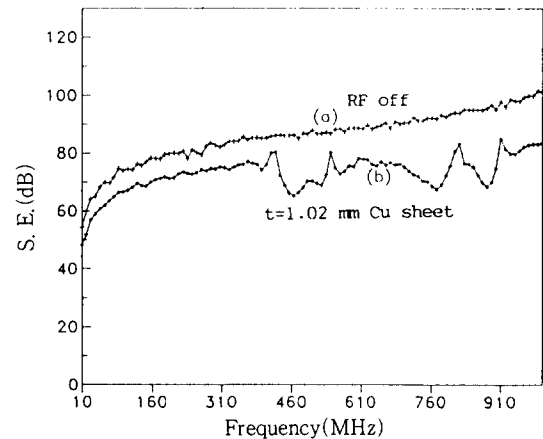
역을 얻을 수 있음을 알 수 있다. 특히 그림의 ((a)의 경우, 100 Hz) 시스템의 배경잡음을 크게 낮춘 경우로써 필요에 따라 측정시스템의 동작영역을 크게 확장시킬 수 있음을 알 수 있다(반면에 측정시간이 크게 길어진다).

[그림 9]는 이중챔버의 동작영역을 나타낸 그림으로서 트랙킹신호원을 사용한 주파수 주사방법에 의한 측정시스템의 동작영역이다. 이 그림으로부터 약 80 dB 정도의 동작영역을 가짐을 알 수 있고, 챔버의 물리적 크기에 따라 공진현상이 일어남을 알 수 있다. 특히 [그림 9(c)]로부터 Electrometrics사 제공 기준 차폐시편의 측정값이 30, 100, 300, 1000 MHz에서 각각 54, 38, 43, 21 dB임을 알 수 있다. 이러한 값을 ASTM 권고값  $48 \pm 3$ ,  $39 \pm 3$ ,  $43 \pm 3$ ,  $15 \pm 3$  및 Electrometrics사 측정값 51, 37, 40, 19와 비교해 볼 때 측정주파수 상, 하한을 제외한 주파수대역에서 비교적 잘 일치함을 알 수 있다. 측정주파수상, 하한에서 약간 벗어나는 것은 제작된 시편의 특성에 기인하는 것으로 보이며, 제작사의 측정값과는  $\pm 3$  dB 내에서 측정값이 잘 일치함을 알 수 있다. [그림 10]은 이중템셀의 동작영역이다. 약 30 MHz 이상의 주파수에서 60 dB 이상의 동작영역



[그림 9] 이중챔버 측정치구 시스템의 동작영역

[Fig. 9] Dynamic range of the dual chamber system.

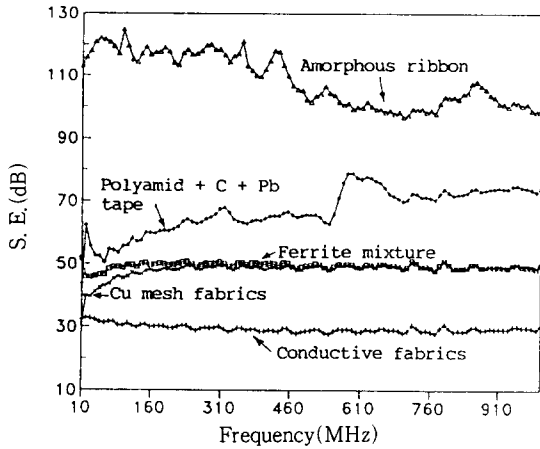


[그림 10] 이중템셀 측정치구 시스템의 동작영역

[Fig. 10] Dynamic range of the dual TEM cell system.

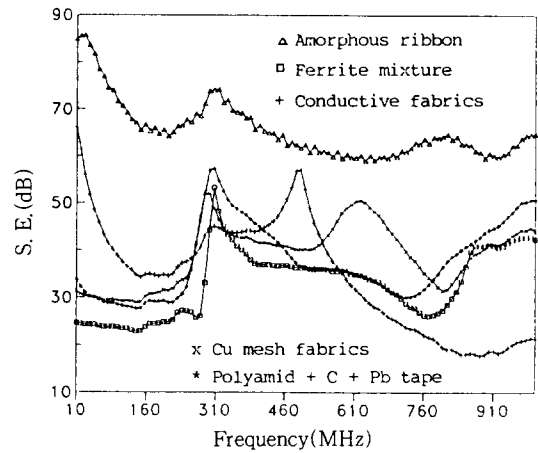
을 가짐을 알 수 있다. 이 측정치구에 대한 기준 차폐시편이 없어 측정값을 확인해 볼 수 없었다.

시중에서 판매되고 있는 다양한 차폐재료에 대해 위의 세종류의 측정치구를 사용하여 전자파 차폐효과를 측정하였으며, 그들 값을 상호 비교하였다. [그림 11]과 [그림 12], 그리고 [그림 13]에서 플랜지형 동축선 측정치구에 의한 측정결과를 기준으로 다른 측정치구에 의한 측정결과를 서로 비교하면, 우선순위가 1위인 재



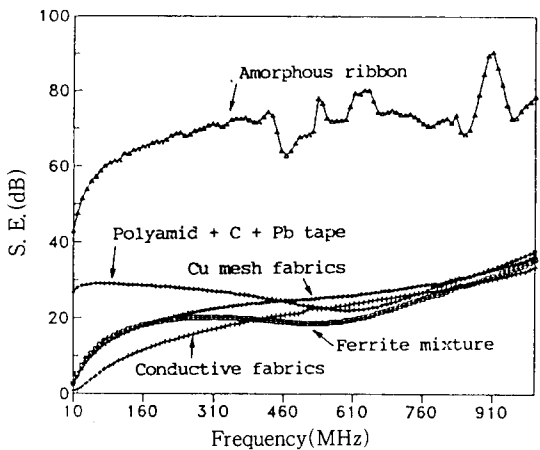
[그림 11] 플랜지형 동축선 측정치구를 이용한 다양한 재료의 전자파 차폐효과 우선순위

[Fig. 11] The priority ranking of various materials in the electromagnetic shielding effectivenesses using a flanged coaxial transmission line sample holder.



[그림 12] 이중챔버 측정치구를 이용한 다양한 재료의 전자파 차폐효과 우선순위

[Fig. 12] The priority ranking of various materials in the electromagnetic shielding effectivenesses using a dual chamber test fixture.



[그림 13] 이중템셀 측정치구를 이용한 다양한 재료의 전자파 차폐효과 우선순위

[Fig. 13] The priority ranking of various materials in the electromagnetic shielding effectivenesses using a dual TEM cell test fixture.

료를 제외하고는 모두 주파수에 따라, 측정치구의 종류에 따라 우선순위가 뒤바뀌는 것을 볼 수 있다. 위의 그

림에서 △표시는 자성아몰퍼스 리본을 이용한 차폐재료, □는 페라이트 분말 혼합재료, +는 구리가 코팅된 섬유, x는 보안기용 동망, \*는 전도성 접착테이프를 나타낸다.

위의 결과로부터 동일한 재료일지라도 다른 측정치구를 사용하면 측정값도 다르게 나올 수 있음을 알 수 있다. 이는 측정치구의 전자파 발생기구가 다르고, 전파 특성도 다르기 때문이다. 특히 이중템셀과 이중챔버의 경우, 시편과 측정치구 사이의 접촉저항에 따라 측정값이 크게 변화할 수 있다. 따라서 재료의 전자파 차폐효과 측정값 내에는 측정치구에 의한 오차가 들어 있고, 결과적으로 특정 재료 자체의 전자파 차폐효과만을 표시하지 않음을 알 수 있다. 따라서 특성이 좋은 측정치구를 표준 측정치구로 결정하여 어떤 재료가 다른 어떤 재료보다 특성이 어느 정도 좋다는 것을 파악함으로써 재료의 차폐성능 우선순위를 결정할 수 있음을 알 수 있다. 앞의 측정 결과로부터 플랜지형 동축선 측정치구가 전 측정주파수대역에 걸쳐 매우 합리적인 결과를 내고 있으며, 따라서 재료의 전자파 차폐효과 평가에 있어서 기준 측정치구로 활용할



수 있음을 알 수 있다.

## V. 결 론

플래지형 동축선 측정치구와 이중챔버 측정치구, 이중템셀 측정치구를 이용하여 10-1000 MHz의 주파수대역에서 사용할 수 있는 원역장 및 근역장, 전기장 차폐효과 측정시스템을 구현하였다. 측정시스템의 동작영역은 플래지형 동축선 측정치구, 이중챔버, 이중템셀 사용여부에 따라 110, 80, 60 dB 이상이며, 전자파차폐 성능을 가진 복합재료의 평가에 효과적으로 활용할 수 있다. 구현된 측정시스템은 신호발생기를 이용한 산재주파수 측정법은 물론 트래킹신호원을 이용하여 소인주파수 방법에 의한 측정을 가능케 함으로써 새로운 차폐재료인 자성손실 재료의 특성 분석을 용이하게 하였을 뿐만 아니라 측정중에 시스템의 오동작을 쉽게 확인할 수 있는 장점을 가지고 있다.

측정치구에 따라, 차폐재료의 종류에 따라 측정결과의 변화양상이 다르며, 성능 우선 순위가 다르게 나타날 수도 있다. 따라서 기준이 되는 표준 측정치구를 설정할 필요가 있으며, 다양한 종류의 차폐재료를 평가해 본 결과 플래지형 동축선 측정치구가 가장 효과적인 측정치구로 판단되었다.

앞으로 플래지형 동축선 측정치구에 의한 측정값으로부터 근역장 차폐효과를 추론할 수 있는 가능성을 검증할 예정이다. 또한 이중템셀을 이용하여 전기장 차폐효과는 물론 자기장 차폐효과도 측정할 수 있도록 할 예정이며, 이들 결과와 송, 수신안테나법에 의한 결과를 비교할 예정이다.

## 참 고 문 헌

1. Perry F. Wilson, Mark T. Ma and J.W. Adams, "Techniques for measuring the electromagnetic

shielding effectiveness of materials : Part I Far-field source simulation," IEEE Trans. Electromagn. Compat., Vol. 30, No. 3, pp. 239-250, Aug. 1988.

2. ASTM D4935-89, "Standard Test Method for Measuring the Electromagnetic Shielding Effectiveness of Planar Materials," Sep. 1989.
3. B.A. Kinningham and D.M. Yenni, Jr., "Test methods for electromagnetic shielding materials," IEEE EMC Int. Symp. Digest, pp. 223-230, Jul. 1988.
4. S.A. Schelkunoff, "*Electromagnetic Waves*" Van Nostrand, New York, pp. 303-315, 1943.
5. Richard B. Schulz, V.C. Plantz, and D.R. Brush, "Shielding theory and practice," IEEE Trans. Electromagn. Compat., Vol. 30, No. 3, pp. 187-201, Aug. 1988.
6. Henry W. Ott, "*Noise reduction techniques in electronic systems*," J. Wiley pub., New York, pp. 137-172, 1976.
7. MIL-STD-285, "Attenuation measurements for enclosures, electromagnetic shielding, for electronic test purposes, method of," U.S. DoD, Jun. 1956.
8. ASTM ES7-83, "Emergency Standard Test Methods for Measuring the Electromagnetic Shielding Effectiveness of Planar Materials," Dec. 1983.
9. Perry F. Wilson and Mark T. Ma, "Techniques for measuring the electromagnetic shielding effectiveness of materials : Part II Near-field source simulation," IEEE Trans. Electromagn. Compat., Vol. 30, No. 3, pp. 251-259, Aug. 1988.