

# 박판접합에 의한 전자기파의 차폐

## (A Study on Laminated Shielding)

명 노 훈\*  
(Noh-Hoon Myung\*)

### 要 約

본 논문에서는 전자기파의 기본 차폐식을 이용하여 금속인 모재에 얇은 두께의 박판으로 접합되어 있는 경우의 차폐이론식을 유도하여, 대표적인 금속 평판 쉴드로 비자성 재료인 Aluminium과 Steel에 전도성도료를 칠했을 경우에 평면파에 대한 차폐 효과를 조사하였다.

### ABSTRACT

In this paper, laminated shielding effectiveness equation is derived from basic shielding theory and this equation is applied to calculate the shielding effectiveness for two typical non-magnetic shielding materials, Aluminium and Steel, when they are coated with conductive paint.

## I. 서 론

근래에 와서 정보화 및 자동화가 진전됨에 따라 통신장비 및 컴퓨터 등 각종 전자장비의 빈번한 이용과 의존으로 인해, 전자장비 상호간의 전자기파에 의한 간섭이 심각한 문제로 대두되게 되었다. 이는 전자장비의 내적 또는 외적 요인으로 인한 전자기파의 발생이 전자회로 또는 각종 반도체소자(마이크로프로세서, RAM, ROM등)에 영향을 주어 오동작(malfunction)을 유발하여 전자장비의 시스템 성능저하(dcgradation of system performance)에 직접적인 원인이 되기 때문이다. 이러한 EMI의 문

제를 줄이기 위해서는 시스템의 설계 단계에서부터 전자장비의 전자기파에 대한 적응성(Electromagnetic Compatibility : EMC)에 대한 문제를 고려하여야 한다.

본 논문에서는 전자기파에 대한 기본 차폐식으로부터 박판접합쉴드(laminated shielding)에 대한 차폐식을 유도하고, 이 식을 이용하여 대표적인 비자성재료인 Aluminium(Al)과 Steel의 모재에 전도성 도료를 칠했을 경우에 차폐효과를 계산한다.

## II. 차폐 기본 이론식

정의에 의하여 두께가 0인 단일쉴드에 의한 차폐 효과(shielding effectiveness)는 [1, 2, 3],

\* 正會員, 韓國科學技術院 電氣 및 電子工學科  
(Electrical Engineering Dept., KAIST)

$$\begin{aligned}
 S &= -20 \log_{10} |T| \\
 &= 20 \log_{10} |e^{\gamma l}| - 20 \log_{10} |p| + 20 \log_{10} |1 - qe^{-2\gamma l}| \\
 &= A + B + R
 \end{aligned} \tag{1}$$

로 나타내어지며, 여기에서  $T$ 는 단일설투의 입사파에 대한 전체 투과계수,  $p$ 와  $q$ 는 각각 설투의 경계면에서의 반사 및 투과계수, 그리고  $\gamma$ 은 입사파의 전파상수를 나타낸다. 식 (1)에서와같이 차폐효과는 보통 세 항목으로 나타내게 되는데,  $A$ 는 설투 내부를 전자파가 투과하면서 발생하는 투과 또는 흡수 감쇄에 대한 항이고,  $R$ 은 설투 내부의 다중반사를 무시했을 때의 설투의 양쪽 경계면에서의 총 반사계수, 그리고  $B$ 는 설투 내부에서의 다중반사를 고려했을 때의 차폐효과의 교정항이다.

일반적으로 단일설투의 전체 차폐효과는 저주파에서는  $R$ 에 의해 지배되고 주파수가 높아질수록  $A$ 가 급격히 커지게 되어  $A$ 에 의해 지배된다.  $A$ 와  $R$ 은 항상 양의 값을 갖지만  $B$ 는 경우에 따라 양과 음의 값을 취한다. 양수일때도 그 값이  $A$ 와  $R$ 에 비해 극히 작기 때문에 대개의 경우  $B$ 에 무시하고 차폐효과를 계산할 때가 많다.

[그림 1]과 같이  $n$ 개의 차폐판이 적층되어 있는 다중설투가 있을 때  $m$ 층의 고유임피던스를  $\eta_m$ , 전파상수를  $\gamma_m$  그리고 그 두께를  $l_m$ 으로 나타내고 각 층에서 입사파의 진행 방향으로 본 임피던스를  $Z(l_m)$ , 입사파의 임피던스를  $Z_w$ 라고 하면 다중설투의 전체 투과계수  $T$ 는 식(1)으로부터 아래 식으로 나타낼 수 있다[1].

$$T = p \frac{e^{-\gamma_1 l_1 - \gamma_2 l_2 \dots - \gamma_n l_n}}{(1 - q_1 e^{-2\gamma_1 l_1}) \dots (1 - q_n e^{-2\gamma_n l_n})} \tag{2}$$

여기에서

$$\begin{aligned}
 p &= \frac{2\eta_0 \cdot 2\eta_1 \cdot 2\eta_2 \dots \cdot 2\eta_n}{(Z_w + \eta_1)(\eta_1 + \eta_2)(\eta_2 + \eta_3) \dots (\eta_n + Z_w)} \\
 q_m &= \frac{(\eta_m - \eta_{m-1})(\eta_m - Z(l_m))}{(\eta_m + \eta_{m-1})(\eta_m + Z(l_m))}
 \end{aligned} \tag{3}$$

위 식에서 각 층의  $q_m$ 과 투과수  $p$ 를 계산하면 다중설투의 차폐효과를 계산할 수 있다.

### Ⅲ. 박판접합설투

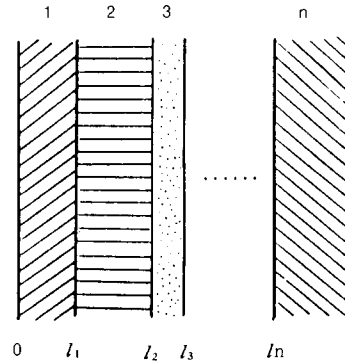


그림 1. 다중차폐막  
Fig. 1. Multimedia Shielding

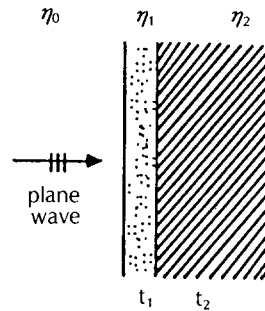


그림 2. 박판접합설투  
Fig. 2. Laminated Shielding

[그림 2]와 같이 모재  $t_2$ 에 얇은 박판  $t_1$ 이 접합되어 있는 박판접합설투(laminated shielding)의 차폐효과 계산식은 식(2)의 다중차폐를 위한 식에서  $n=2$ 인 경우이다. 이때 각각의 항들을 정리하면 다음과 같다.

$$\begin{aligned}
 A &= 20 \log_{10} |e^{\gamma_1 t_1 + \gamma_2 t_2}| \\
 \gamma_1 &= j\omega \sqrt{\mu \epsilon} \\
 \gamma_2 &= (1 + j) \sqrt{\pi \mu f \sigma}
 \end{aligned} \tag{4}$$

$$\begin{aligned}
 R &= 20 \log_{10} \left| 1 + \frac{\eta_1}{\eta_0} \right| + 20 \log_{10} \left| 1 + \frac{\eta_2}{\eta_1} \right| \\
 &= +20 \log_{10} \left| 1 + \frac{\eta_0}{\eta_2} \right| - 20 \log_{10} 8
 \end{aligned} \tag{5}$$

$$\eta_1 = \sqrt{\frac{j\omega\mu}{\sigma + j\omega\epsilon}}, \quad \eta_0 = \sqrt{\frac{\mu_0}{\epsilon_0}}, \quad \eta_2 = \sqrt{\frac{\pi\mu f}{\sigma}}$$

$$B = 20 \log_{10} |1 - q_1 e^{-2\gamma_1 t_1}| + 20 \log_{10} |1 - q_2 e^{-2\gamma_2 t_2}| \quad (6)$$

모재  $t_2$ 가 Al이나 Steel과 같은 비자성 금속이고 이 모재에 전도성 도료를 칠했을 때 식(4)~(6)에서 나타난 차폐효과식의 각 항을 나타내면 아래와 같다.

1. 흡수감쇄(A)

보통 전도성도료의 전도도는  $10^2$ 에서  $10^6$  ( $\Omega m$ )<sup>-1</sup> 정도이고  $\epsilon_r$  은 2에서 4정도이므로 1GHz이하에서는 금속에 가까운 성질을 지닌다. 따라서 박판  $t_1$ 의 전파상수는

$$\gamma_1 \approx (1 + j)\sqrt{\pi\mu_r\mu_0 f\sigma_1} \quad (7)$$

가 된다. 한편 각 매질의 흡수감쇄  $A_1, A_2$ , 를 식(4)에 의해 정리하면 다음과 같다.

$$A_1 = 1.314 \times 10^{-4} \sqrt{f\mu_r\sigma_1} t_1$$

$$A_2 = 0.314 \sqrt{f\mu_r\sigma_2} t_2 \quad (t_1 : \mu m, t_2 : mm) \quad (8)$$

$A_1$ 은 얇고 모재에 비해 비교적 낮은 전도도 때문에  $A_2$ 보다 무시할 수 있을 정도로 매우 작다. 따라서 흡수감쇄에 의한 전도성도료의 차폐효과 증가는 기대하기 어렵다.

2. 반사감쇄(R)

식(5)에 의해 각 고유임피던스의 비가 반사감쇄 R을 좌우한다.  $|\eta_0| \gg |\eta_1| > |\eta_2|$  이므로  $|\eta_1/\eta_0| \ll 1$  이기 때문에 첫 항은 고려하지 않아도 된다.  $|\eta_2/\eta_1|$ 는 다음과 같이 나타내어진다.

$$\frac{\eta_2}{\eta_1} = \frac{\sqrt{\frac{j\omega\mu_2}{\sigma_2 + j\omega\epsilon_2}}}{\sqrt{\frac{j\omega\mu_1}{\sigma_1 + j\omega\epsilon_1}}} \approx \sqrt{\frac{\mu_2\sigma_1}{\mu_1\sigma_2}} = \sqrt{\frac{\mu_r2\sigma_{r1}}{\mu_{r1}\sigma_{r2}}} \quad (9)$$

그리고 반사감쇄를 좌우하는  $|\eta_0/\eta_1|$ 는 다음과 같다.

$$\frac{\eta_0}{\eta_2} = \sqrt{\frac{\sigma_2}{\pi f \mu_r \sigma_0}} \frac{1}{(1 + j)} \quad (10)$$

식(9)에서 보인 바와같이  $|\eta_2/\eta_1|$ 는 투자율과 전도도의 비로만 나타나고 주파수에는 무관하기 때문에 주파수에 관계없이 일정한 수준 이상의 차폐효과를 얻을 수 있다. 박판접합실드에서의 차폐효과를 높이려면 이 비를 크게하여야 하는데 이 값을 크게하려면 높은 전도도를 가진 비자성재료와 전도성이 약한 강자성재료를 접합하면 된다. 예를 들어 구리( $\sigma_r = 1, \mu = 1$ )와 mu-metal( $\sigma_r = 0.03, \mu = 80,000$ )을 쓰면 반사감쇄만으로도 주파수에 관계없이 60dB 정도의 차폐효과를 얻을 수 있다. 차폐하기 어려운 자기장에 대해서도 주파수와는 무관한 최소한의 차폐가 가능하다.

4. 반복반사에 의한 교정(B)

B항을  $t_1$ 에서는  $B_1, t_2$ 에서는  $B_2$ 로 나누어 계산하면 각 식은 식 (7)와 같은 형식으로 아래와같이 나타낼 수 있다.

$$B_1 = 20 \log_{10} |1 - q_1 e^{-2\alpha - 2\beta}|$$

$$= 20 \log_{10} |1 - q_1 10^{-\frac{2\alpha}{10}} e^{-j0.23\beta}| \quad (11)$$

코팅한 경우  $t_1$ 에서의  $A_1$ 이 아주 큰 값이 아니므로  $B_1$ 은 무시할 수 없을 정도의 큰 값을 가진다. 그러나  $t_2$ 에서는 금속 내부에서의 많은 흡수감쇄로  $B_2$ 는 매우 작다. 이 B는 차폐효과를 줄이는 것으로 대개 음의 값을 갖는다.

IV. 전도성도료를 이용한 차폐효과

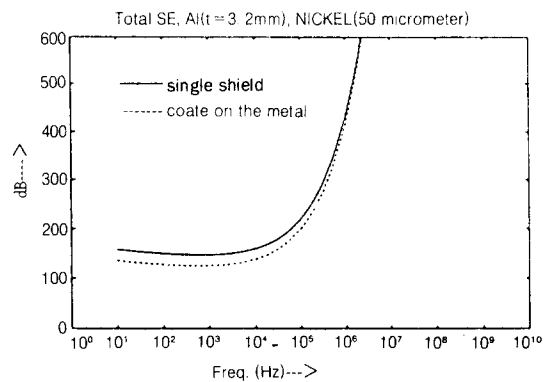


그림 3. Al의 전도성도료에 의한 주파수 별 차폐효과 비교

Fig. 3. Shielding effectiveness of Al coated with conductive paint as a function of frequency

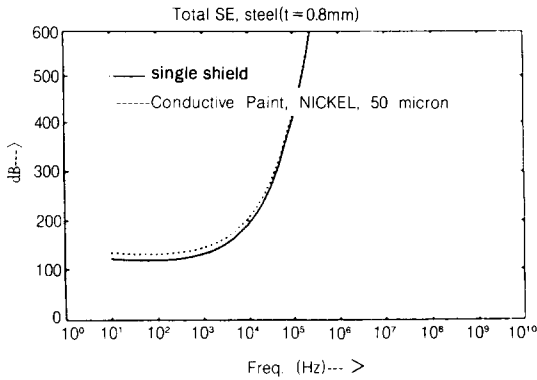


그림 4. Steel의 전도성도료에 의한 주파수 별 차폐 효과 비교

Fig. 4. Shielding effectiveness of Steel coated with conductive paint as a function of frequency

[그림 3, 4]는 Al과Steel에 50 $\mu$ m 두께의 니켈을 함유한 전도성도료 (전도도가 10<sup>5</sup>mho/m로 차폐 효과가 비교적 우수하여 산업기기 및 일반용으로 널리 쓰임)를 칠했을 때의 평면파에 대한 차폐효과를 나타낸다. Al에서의 차폐효과를 살펴보면 오히려 차폐효과가 감소하는 결과가 나온다. 이것은 전도성도료에서 두 매질의 경계에서 반사되어 돌아가는 파를 다시 진행방향으로 보내어주기 때문이다. 그리고 두께가 얇은 t<sub>1</sub>에서의 흡수감쇄는 작기 때문에 전체 차폐효과를 늘려주지 못한다. Steel에서는 약간 커지지만 큰 효과를 기대하기는 어렵다.

주파수가 증가할수록 B항의 영향이 작아지므로

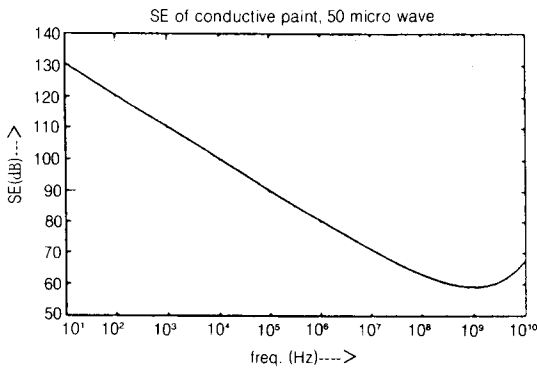


그림 5. 전도성도료의 반복된 반사에 의한 주파수 별 차폐효과

Fig. 5. Shielding effectiveness by re-reflection correction term as a function of frequency

전도성도료를 칠했을 때와 그렇지 않았을 때가 구별되지 않는다. [그림 5]는 Al과 Steel에서 반복 반사에 의해서 차폐효과를 감소시키는 B항만을 나타내었다. Al의 경우에는 고주파에서는 영향이 없지만 저주파에서는 적지않게 차폐효과를 감소시킨다.

전도성도료는 원래 제품의 경량화 등을 이유로 외장을 플라스틱화함으로써 발생하는 전자기파방해를 차폐할 목적으로 플라스틱 표면에 칠하도록 되어있다. 그러므로 이 전도성도료보다 차폐효과가 월등한 금속면에 칠할 필요는 없다. 전도성도료는 50 $\mu$ m 정도의 두께로 1~1000 MHz의 주파수 범위에서 50~60 dB의 차폐효과를 얻을 수 있도록 한다. [그림 6]은 50 $\mu$ m의 니켈을 함유한 전도성도료만의 차폐효과를 나타낸다.

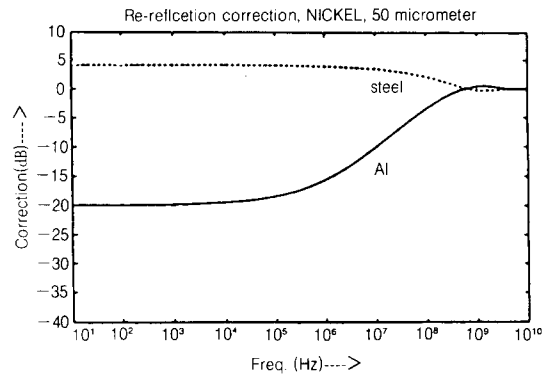


그림 6. 전도성도료의 주파수 별 차폐효과

Fig. 6. Shielding effectiveness of conductive paint itself as a function of frequency

## V. 결 론

본 논문에서는 기본적인 차폐이론식을 이용하여 모재가 Al과 Steel인 비자성 금속재료에 전도성도료를 칠했을 때의 차폐효과를 조사하기 위하여, 박판접합설드의 차폐효과 계산식을 유도하였다.

박판접합설드의 흡수감쇄에 의한 차폐효과는 보통 전도성도료의 전도도가 모재가 Al과 Steel과 같은 금속일 경우 모재보다 낮기 때문에 전도성도료에 의한 차폐효과의 증가를 기대하기 어렵다. 한편, 반사에 의한 차폐효과는 각 재료의 고유임피던스의 비로써 나타나게 되는데, 이는 투자율과 전도도의

## 參 考 文 獻

비로만 나타나고 주파수에는 무관하다. 따라서 주파수에 관계없이 일정한 수준 이상의 차폐효과를 얻을 수 있다. 또한 반사감쇄에 의한 차폐효과를 얻으려면 고유임피던스의 비를 크게 하여야 하는데 이는 높은 전도도를 가진 비자성재료와 전도성이 약한 강자성재료를 접합하여야 한다. 이러한 박판접합설드를 이용하면 반사감쇄만으로도 주파수과 관계없이 60dB 정도의 차폐효과를 얻을 수 있으며 차폐하기 어려운 자기장에 대해서도 주파수와 무관한 최소한의 차폐가 가능하다.

- (1) Donald, R. J. White, "EMC Handbook", Vol. 3
- (2) B. Keiser, "Principles of Electromagnetic Compatibility", 3rd. ED. Chapter6.
- (3) R. Schulz, et. al., "Shielding Theory and Practice", IEEE Trans. Elect. Compt. Vol. 30, No. 3, Aug. 1988, pp. 187-201