

동작 주파수에 따른 Dk의 변화가 임피던스 부정합에 미치는 영향 Effects on Impedance Mismatch by Dk Variation with Operating Frequency

이 종 학*, 김 창 균**, 라 영 은*, 이 건 민*, 이 성 수**★

Jong-Hak Lee*, Chang-Gyun Kim**, Young-Eun Ra*, Keon-Min Lee,*
and Seongsoo Lee**★

Abstract

Accurate material information is very important in PCB (Printed Circuit Board) design. In an integrated mast of a battleship, heat reduction is essential for stealth functionality. So heat dissipation from internal control equipments should be reduced as much as possible. Control equipments mostly consist of PCBs, but it often suffers from impedance mismatching due to imprecise Dk (Dielectric Constant), which significantly increases heat dissipation. In this paper, measurement methods of Dk is investigated. Also, effects on impedance mismatch by Dk variation with operating frequency is investigated.

요 약

PCB (Printed Circuit Board)를 설계할 때 정확한 재료 정보는 매우 중요하다. 전투함의 통합 마스트 (Integrated Mast)에서는 스텔스 기능을 위해 열 저감이 필수적이며 이를 위해서는 내부의 제어 장치에서 발생하는 열을 최대한 줄여야 한다. 제어 장치는 대부분 PCB로 이루어져 있으나 PCB의 유전상수 (Dk, Dielectric Constant)가 정확하게 알려져 있지 않아 임피던스 부정합이 발생하며 이는 열 발생을 매우 증가시킨다. 본 논문에서는 Dk의 측정 방법에 대해 살펴보고 동작 주파수에 따른 Dk 값의 변화가 임피던스 부정합에 미치는 영향을 살펴본다.

Key words : Printed Circuit Board, Impedance Matching, Dielectric Constant, FR-4, Heat Reduction

* LIG Nex1 Co. Ltd.

** School of Electronic Engineering, Soongsil University

★ Corresponding author

E-mail : sslee@ssu.ac.kr, Tel : +82-2-820-0692

※ Acknowledgment

This work was supported by the MOTIE (Ministry of Trade, Industry & Energy) (10080649) and KSRC (Korea Semiconductor Research Consortium) support program for the development of the future semiconductor device.

Manuscript received Dec. 28, 2019; revised Dec. 30, 2019; accepted Dec. 30, 2019.

the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

1. 서론

전투함에 널리 채택되고 있는 통합 마스트는 적에게 탐지가 되지 않도록 스텔스 기능을 갖추어야 한다. 현대전에서 큰 의미가 없는 가시안적 탐색을 제외한다면 저피탐을 위해서 레이더 반사 면적을 저감하거나 열 저감을 수행해야 한다[1]. 해상에서는 레이더 탐지가 많이 사용되고 있지만 최근 들어 인공위성이나 정찰기 등에서 적외선 카메라 등을 통한 열화상 탐지도 많이 이루어지기 때문에 열 저감도 매우 중요해지고 있다.

전투함에서 열 저감이 가장 필요한 곳은 통합 마스트 (Integrated Mast)이다. 통합 마스트 내부에는

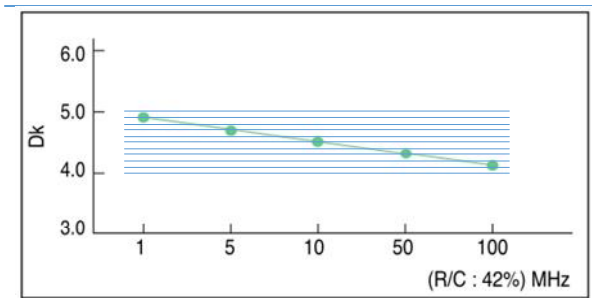


Fig. 1. FR-4 (DS-7408) dielectric constant [4].
그림 1. FR-4 (DS-7408)의 유전상수 [4]

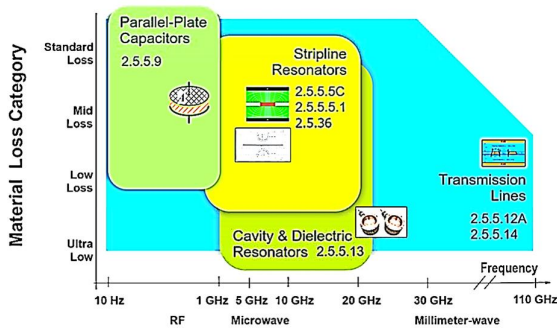


Fig. 2. Dk measurement standards by IPC [5].
그림 2. IPC에서 제정한 Dk 측정 표준 [5]

많은 레이다와 통신 장치를 일반 건물 3~5층 높이 정도까지 설치하기도 한다. 이들 장치는 많은 전력을 사용하므로 열 또한 많이 발생한다.

이러한 열 발생 중에서 상당 부분을 담당하고 있는 것이 PCB(Printed Circuit Board)이다. PCB 상에서 소자 사이를 이어주는 전송 선로에서 임피던스 정합(Impedance Matching)이 제대로 이루어지지 않으면 많은 신호 손실이 발생하고 그 대부분이 발열로 이어지게 된다.

본 논문에서는 임피던스 정합을 부정확하게 하는 주요 원인의 하나인 유전상수(Dk, Dielectric Constant)의 측정에 대해 살펴보고 Dk 값이 열 발생 측면에서 어떤 문제를 일으키는지 살펴본다.

II. Dk의 측정 및 예측

임피던스를 정합하기 위해서는 유전상수(Dk, Dielectric Constant)를 정확하게 알고 있어야 한다. 임피던스는 식 (1), (2)와 같이 계산되는데[2] 이 값이 Dk의 함수로 나타나기 때문이다.

$$\begin{aligned} \text{If } \frac{W}{h} < 1 \quad Z_0 &= \frac{60}{\sqrt{\epsilon_{eff}}} \times \ln\left(\frac{8h}{W} + \frac{W}{4h}\right) \\ \text{else} \quad Z_0 &= \frac{120}{\sqrt{\epsilon_{eff}}} \times \frac{1}{\left(\frac{W}{h} + 1.393 + 0.677 \times \ln\left(\frac{W}{h} + 1.444\right)\right)} \end{aligned} \quad (1)$$

$$\begin{aligned} \text{If } \frac{W}{h} < 1 \quad \epsilon_{eff} &= \frac{Dk+1}{2} + \frac{Dk-1}{2} \left(\frac{1}{\sqrt{1+\frac{12h}{W}}} + 0.04 \left(1 - \frac{W}{h}\right)^2 \right) \\ \text{else} \quad \epsilon_{eff} &= \frac{Dk+1}{2} + \frac{Dk-1}{2} \left(\frac{1}{\sqrt{1+\frac{12h}{W}}} \right) \end{aligned} \quad (2)$$

Z₀: 라인 길이 W: 라인 폭
h: 유전체 두께 Dk: 유전상수

문제는 Dk가 주파수에 따라 다른 값을 가지고 있는데 비해 대부분의 PCB 설계자들은 주파수를 무시한 단일 Dk 값을 사용한다는 점이다. 이는 PCB 제조사가 PCB의 임피던스를 측정할 때 제품의 주파수와 무관하게 측정하는 방법을 사용하여 검사하는 관행을 따르기 때문이다.

또한 Dk 값을 주파수에 따라 다르게 쓰고 싶어도 PCB 제조사가 원하는 동작 주파수에서의 Dk 값을 제대로 제공하지 않는 경우도 많다. FR-4 (Flame Retardant Composition 4)는 PCB에서 가장 흔히 쓰이는 유전물질로 내염성의 에폭시 수지와 직조 천 모양의 유리 섬유로 구성된 복합 재료이며 무기 체계뿐만 아니라 일반 전자 제품에서도 널리 사용되고 있다[3]. 그림 1은 FR-4 데이터시트에서 주파수에 따른 Dk의 변화를 나타낸 것인데 1MHz에서는 4.9 정도의 값을 가지고 100MHz에서는 4.15 정도의 값을 가지는 것을 확인할 수 있다.

그림 2는 IPC(Association Connecting Electronics Industries)에서 표준으로 제정한 Dk의 측정 방법이다. Parallel-Plate Capacitors 측정 기법, Stripline Resonators 측정 기법, Cavity & Dielectric Resonators 측정 기법, Transmission Lines 측정 기법 등이 있으며 주파수와 물질 특성에 따라 적용할 수 있는 범위에 한계가 있다.

이 중에서 가장 널리 쓰이는 측정 기법은 Parallel-Plate Capacitors 측정 기법[6]인데 캐패시터를 제작하여 정전용량을 측정하여 Dk를 구한다. 측정이 간단하고 쉽다는 장점이 있는데 반하여 정밀도가 낮고 타 측정법에 비해 손실이 다소 높은 편이며 측정할 수 있는 주파수가 1.5GHz 이하 정도라는 단점이 있다.

Transmission Lines 측정 기법[7]은 Parallel-Plate Capacitors 측정 기법보다 측정 가능 주파수가 높아서 거의 전 주파수 대역에서 측정이 가능하지만 측정이 까다롭고 테스트패턴의 설계도 어려운 편이다. 이 측정 기법의 테스트패턴은 전송선로 이론의 차동-쌍 전송선로 형태를 가진다. 이 방법은 ASTM International(American Society for Testing

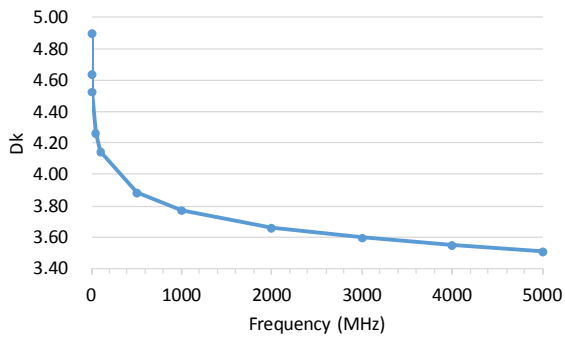


Fig. 3. Estimated Dk values with operating frequency.
 그림 3. 동작 주파수에 따른 Dk의 예측값

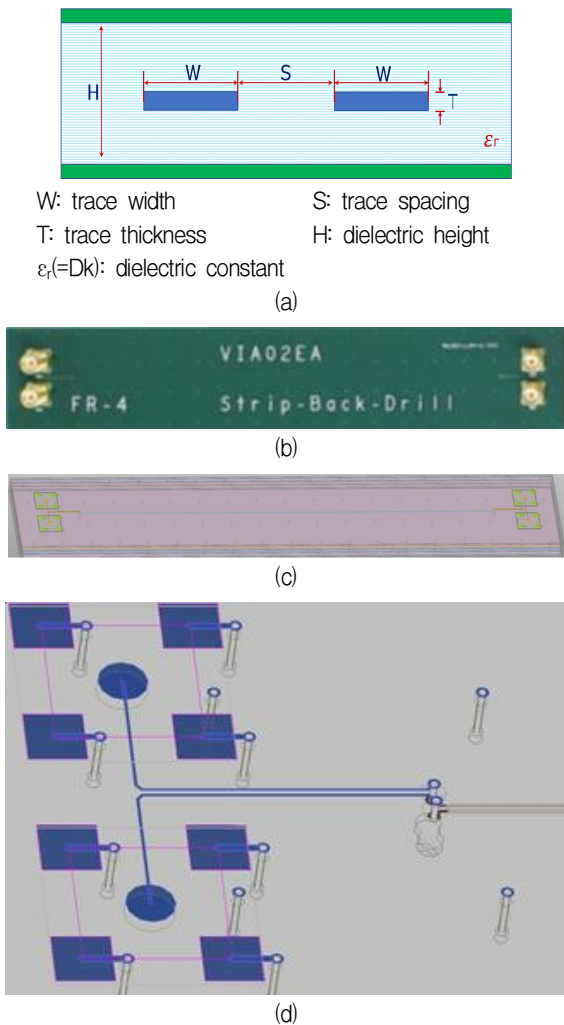


Fig. 4. Test pattern (a) Edge-coupled symmetric strip transmission line (b) Fabricated PCB (c) PCB modeling (d) Magnified modeling of SMA connectors in (c)
 그림 4. 테스트패턴 (a) 차동-쌍 스트립 전송선 (b) 제작된 PCB (c) PCB 모델링 (d) (c)에서 SMA 커넥터 모델의 확대도

and Materials International)의 D3380 규정에 나오는 회로 기판의 상대 유전율 및 소산 인자에 대한

표준 시험 방법이다.

본 논문에서는 주파수에 따른 Dk의 변화를 예측하기 위해 그림 1의 주파수와 Dk 사이 지수적 관계가 통합 마스트의 유효 동작 주파수인 4GHz에도 유효하다고 가정하였다. 이때의 Dk는 그림 3과 같으며, 4GHz에서 Dk는 약 3.55가 된다.

III. 테스트패턴 및 측정

그림 4 (a)는 테스트패턴에 사용된 차동-쌍 전송선로의 단면도이며 그림 4 (b)는 테스트패턴을 실제로 제작한 PCB이며 그림 4 (c)는 해석을 위한 모델링데이터이다. 그림 4 (d)는 그림 4 (c)에서 SMA (Sub-Miniature Version A) 커넥터 부분을 확대한 그림이다. 전송 손실을 최소화하기 위해서 전송선로 상의 비아(Via)에서 필요 없는 구간에 대해 백 드릴링(Back Drilling) 기법을 적용하였다. 또한 SMD(Surface Mount Device)의 패드 부분에서 고속 신호에서 정전 용량에 의한 손실이 커지는 것을 막기 위해 패드 아래 부분에 동판을 제거하여 손실량을 최소화하였다[9].

그림 5의 하늘색 실선은 그림 4의 PCB 테스트패턴에서 S21을 측정된 값이며 이 그래프를 선형화한 값이 적색 점선이다. 이 PCB에는 기존 설계처럼 주파수를 무시한 Dk 값인 4.6을 사용했다.

주파수에 따른 Dk 변화는 그림 3에서 추정하였으며 그 결과는 그림 5의 회색 실선과 같다. 이때 4GHz대에서 추정된 Dk의 값인 3.55를 사용하여 S21을 ANSYS사의 SIwave로 시뮬레이션하였다. 그 결과는 그림 5의 녹색 실선과 같으며 이 그래프를 선형화한 값이 청색 점선이다.

기존 설계자처럼 Dk를 4.6으로 한 경우와 주파수에 따른 Dk 변화를 적용하여 3.55로 한 경우를 비교하면 기존 설계의 S21(적색 점선)이 주파수 변화를 반영한 설계의 S21(청색 점선)보다 훨씬 낮고 그만큼 입력 신호가 전달이 잘 되지 않음을 볼 수 있다. 충분히 전달이 되지 못한 입력 신호는 대부분 PCB 상에서 열로 변화하기 때문에 열 저감에 크게 방해가 된다.

IV. 결론

전투함의 통합 마스트에서는 스텔스 기능을 위해

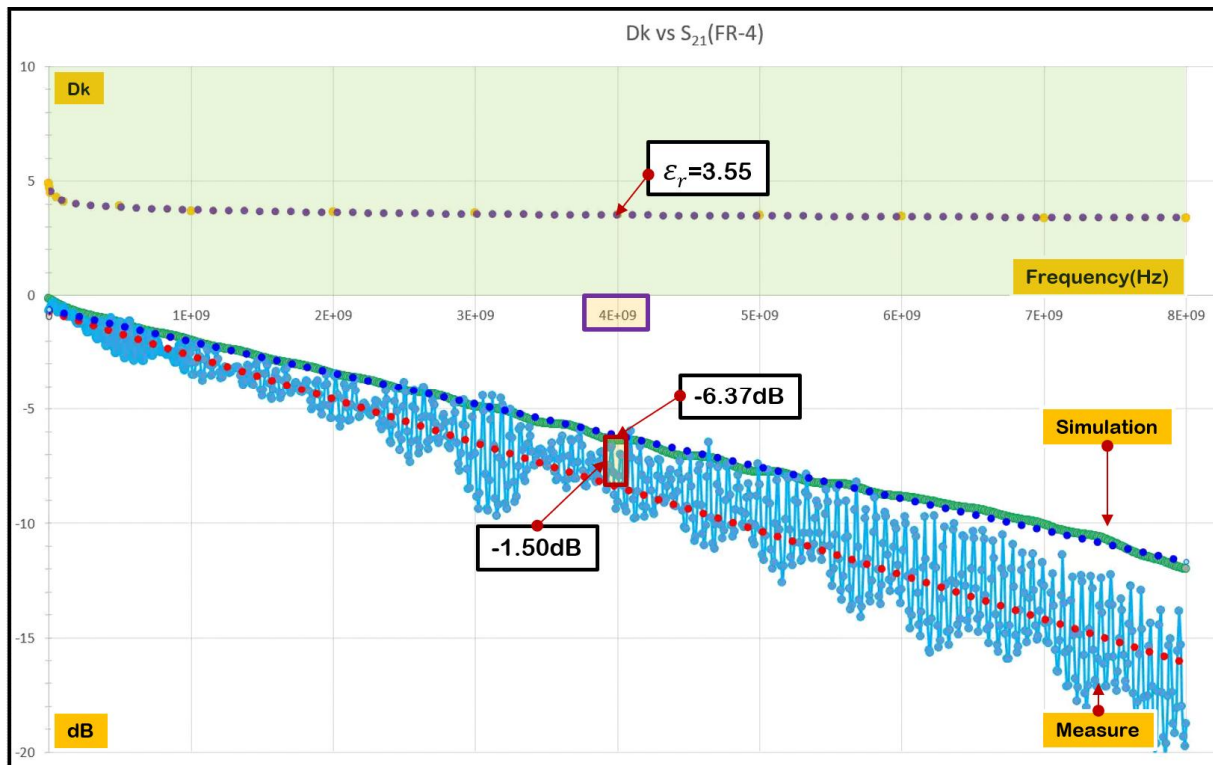


Fig. 5. S21 whether Dk variation with operating frequency is considered or not.

그림 5. 동작 주파수에 따른 Dk 변화를 고려했을 경우와 그렇지 않은 경우의 S21

열 저감이 필수적이며 이를 위해서는 내부의 제어 장치에서 발생하는 열을 최대한 줄여야 한다. 제어 장치는 대부분 PCB로 이루어져 있으나 Dk가 정확하게 알려져 있지 않아 임피던스 부정합이 발생하며 이는 열 발생을 매우 증가시킨다.

본 논문에서는 주파수에 따른 Dk 변화를 추정 한 후, 이를 반영한 경우와 아닌 경우의 S21을 비교 하였으며, 기존 설계가 주파수 변화를 반영했을 때보다 입력 신호가 전달이 잘 되지 않음을 알았다. 따라서 주파수에 맞는 Dk를 사용하여 PCB를 설계해야 확실하게 열 저감을 이룰 수 있다.

References

- [1] H. Shin, S. Lee, D. Park, J. Shin, M. Chung, S. Park, and Y. Park, "Analysis of Radar Cross Section of the Integrated Mast Module for Battleship," *The Journal of Korean Institute of Electromagnetic Engineering and Science*, vol.28, no.7, pp.584-587, 2017.
DOI: 10.26866/jees.2017.17.4.238
- [2] C. Kim and S. Lee, "Ultra-High-Speed PCB

Design Methods," *j.inst.Korean.electr.electron.eng*, vol.22, no.3, pp.882-885, 2018.

DOI: 10.7471/ikeee.2018.22.3.882

- [3] S. Kim, S. Lee, J. Yang, and D. Park, "Analysis of Thermal Properties in LED Package by Via-hole and Dimension of FR4 PCB," *Journal of KIEEME*, vol.24, no.3, pp.234-239, 2011.

DOI: 10.4313/JKEM.2011.24.3.234

- [4] "DS-7408," <http://www.srpcb.com/bbs/download.php?no=73&name=DS-7408.pdf>
- [5] "IPC TM-650 Test Methods Manual," <http://www.ipc.org/test-methods.aspx>

- [6] "Permittivity and Loss Tangent, Parallel Plate, 1MHz to 1.5 GHz," <http://www.ipc.org/TM/2.5.5.9.pdf>

- [7] "Test Methods to Determine the Amount of Signal Loss on Printed Boards," <http://www.ipc.org/TM/2.5.5.12A.pdf>

- [8] "Standard Test Method for Relative Permittivity (Dielectric Constant) and Dissipation Factor of Polymer-Based Microwave Circuit Substrates," <https://www.astm.org/Standards/D3380.htm>