

## 전자파에 의한 대형구조물 내부 케이블 영향 해석

### Cable Effect Analysis Inside an Electrically Large Structure from an External Electromagnetic Waves

이재민 · 윤성식 · 이재욱 · 한정훈\*

Jae-Min Lee · Seong-Sik Yoon · Jae-Wook Lee · Jung-Hoon Han\*

#### 요 약

전자, 통신 기술의 발달로 대부분의 장소에서 전자기기가 존재한다. 자동차, 열차, 항공기 등 다양한 장소에서 전자기기의 활용이 증가된 만큼 고출력 전자기파로 인한 오작동과 하드웨어의 치명적인 손상을 확인할 수 있는 안전성을 연구하는 것이 중요하게 되었다. 구조물 내부에 전자기기 및 여러 센서를 연결하는 케이블은 전자기파에 의한 오작동을 초래할 수 있는 원인 중 하나이기 때문에 전자파 영향에 대한 해석이 필수적이다. 본 논문에서는 상관관계 함수와 전송이론을 이용하여, 전기적으로 큰 공간 내부에 존재하는 케이블에 유기되는 전류를 계산해 외부 전자기파에 의한 영향을 해석하였다.

#### Abstract

With the help of technical development in the electronic industries, the electronic devices employing the cutting-edged technology are spread in all the area requiring electromagnetic communications. Especially, because of the presence of electronic devices in a variety of research fields like automotive vehicle, train, and aircraft, the research area such as the malfunction and critical damage of the internal system and microwave devices due to the unexpected radiated high-powered EM effects are very important even for the possible occurrence of human damage. In this paper, the effects of electromagnetic fields into the cable connecting the electronic devices and many sensors inside the target structure is treated because of potential malfunction or hardware disorders. In addition, correlation function and transmission line theory have been employed for the analysis of the induced current on the cable inside an electrically large resonant structure.

Key words: Correlation Function, Transmission Line Theory, Electrically Large Resonant Structure, Induced Current on the Cable

#### I. 서 론

전송선로 이론이 기반인 수치해석 방법으로 전자기파로 인해 발생하는 EMC(Electromagnetic Compatibility)에

대한 EM coupling 분석이 가능해졌다. 하지만 전자기파의 주파수가 높아지거나 구조물의 크기가 커질수록 내부에서 발생하는 문제에 대해서 기존의 수치해석 방법으로 다루기 어렵다. 이러한 문제를 해결하기 위해 상관관계

한국항공대학교 항공전자정보공학부(Department of Electronics and Information Engineering, Korea Aerospace University)

\*국가보안기술연구소(National Security Research Institute)

· Manuscript received October 7, 2016 ; Revised November 30, 2016 ; Accepted February 7, 2017. (ID No. 20161007-04S)

· Corresponding Author: Jae-Wook Lee (e-mail: jwlee1@kau.ac.kr)

함수(correlation function)로 구한 케이블의 평균결합단면적으로 구조물 내부의 전자기파에 의해 유도되는 전류를 구하고자 한다.

## II. 상관관계 함수

전송선로이론을 기반으로 해석하는 수치해석법은 저주파수에서의 전자기파 영향은 쉽게 해석 가능하지만, 주파수가 높아질수록 내부의 해석이 어려워지기 때문에 상관관계 함수를 이용해 해석하고자 한다. 본 논문의 해석 환경 대상인 그림 1은 MSRC(Mode-Stirred Reverberation Chamber)내에 케이블이 있고, 양 끝에 2개의 부하가 연결되어 있을 때, 임의의 평면파가 케이블로 입사되고 있는 전자파 환경을 나타낸다.

그림 1과 같은 전자파 환경에서 케이블은 벽에서 짧은 거리로 떨어져 있고, 이 케이블에 입사하는 전기장의 세기를 상관관계 함수로 구할 수 있다. 상관관계 함수는 전송선로 이론으로 케이블의 평균결합단면적을 구하기 위한 중요한 방법으로 적용된다.

$$\sigma_{wire} = \frac{P_{mean}}{S_{mean}} \quad (1)$$

식 (1)은 케이블의 평균결합단면적( $\sigma_{wire}$ )을 정의하는 식이다. 식 (1)에 포함된 평균전력( $P_{mean}$ )은 케이블에서 소모되는 평균전력을 의미하고, 평균전력밀도( $S_{mean}$ )는

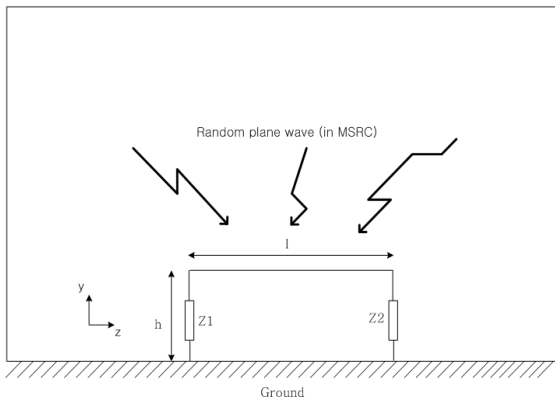


그림 1. MSRC 내부의 전자파 환경  
Fig. 1. The electromagnetic environment inside MSRC.

케이블이 포함하고 있는 에너지 레벨의 평균전력밀도이다. 각각을 아래 식 (2)로 쓸 수 있다.

$$P_{mean} = \frac{\text{Re}[Z_1]}{2} \langle |I_1|^2 \rangle \quad (2)$$

$$S_{mean} = \frac{1}{2} \cdot \frac{E_0^2}{120\pi} \quad (3)$$

식 (2)에  $Z_1$ 은 케이블 좌측단의 임피던스이며,  $I_1$ 은 해당 임피던스에 유기된 전류 값이다. 식 (3)은 MSRC 내부에 실효치 전계 값을 제공한 값에 공기 중 임피던스( $\eta_0$ )로 나누어 정의하였다.

$$I_1 = \frac{1 - \rho_1}{e^{\gamma(l+2h)} - \rho_1 \rho_2 e^{-\gamma(l+2h)}} \times [e^{\gamma(l+2h)} Q(0) - \rho_2 e^{-\gamma(l+2h)} P(l+2h)] \quad (4)$$

$$\rho_1 = \frac{Z_1 - Z_c}{Z_1 + Z_c}, \quad \rho_2 = \frac{Z_2 - Z_c}{Z_2 + Z_c} \quad (5)$$

식 (4)<sup>[2]</sup>의  $\rho_1$ 과  $\rho_2$ 는 좌측 저항( $Z_1$ )과 우측 저항( $Z_2$ )에서의 반사계수이며, 케이블의 특성임피던스( $Z_c$ )와의 관계로 식 (5)로 표현한다.  $Q(0)$ 는 좌측저항에 유기되는 전류,  $P(l+2h)$ 는 우측저항에 유기되는 전류이다.

$$P(s_0) = \frac{1}{2Z_c} \int_0^{s_0} e^{\gamma s} \vec{E}(s) ds, \quad Q(s_0) = \frac{1}{2Z_c} \int_{s_0}^{l+2h} e^{-\gamma s} \vec{E}(s) ds \quad (6)$$

양측 부하에 유기되는 전류를 입사되는 전계( $\vec{E}(s)$ )의 방향에 따라서 상세하게 다시 전개할 수 있으며, 유기되는 전류의 방향은 크게 케이블( $E_z$ )과 수평인 방향과 부하( $E_y$ )에 수평인 방향의 전계와 관련된 식으로 나뉜다. 전류의 측정 지점인 ( $s_0$ )를 좌측 저항의 끝( $Q(s_0=0)$ )과 우측 저항의 끝( $P(s_0=l+2h)$ )일 경우 식 (7)과 (8)처럼 계산할 수 있다.

$$Q(0) = Q_y^1 + Q_z + Q_y^2$$

$$Q_y^1 = \frac{1}{2Z_c} \int_0^h e^{-\gamma y} E_y(0, y, 0) dy$$

$$Q_z = \frac{1}{2Z_c} e^{-\gamma h} \int_0^l e^{-\gamma z} E_z(0, h, z) dz$$

$$Q_y^2 = \frac{1}{2Z_c} e^{-\gamma(l+h)} \int_0^h e^{-\gamma y} E_y(0, y, l) dy$$
(7)

$$P(l+2h) = P_y^1 + P_z + P_y^2$$

$$P_y^1 = \frac{1}{2Z_c} \int_0^h e^{\gamma y} E_y(0, y, l) dy$$

$$P_z = \frac{1}{2Z_c} e^{\gamma h} \int_0^l e^{\gamma z} E_z(0, h, z) dz$$

$$P_y^2 = \frac{-1}{2Z_c} e^{\gamma(l+h)} \int_0^h e^{\gamma y} E_y(0, y, l) dy$$
(8)

식 (7)과 (8)에서는  $Q(0)$ 와  $P(l+2h)$ 를 계산할 때 전계의 방향과 케이블, 저항의 위치에 따라 세 가지로 나누었다.  $Q_y^1$ 은 우측저항,  $Q_z$ 는 케이블,  $Q_y^2$ 는 좌측저항에서 우측저항의 측정지점인  $s_0 = 0$ 으로 흐르는 전류를 나타내고,  $P(l+2h)$ 도 마찬가지로  $s_0 = l+2h$ 로 흐르는 전류를 나타낸다. 식 (7)과 (8)을 계산하여 식 (4)에 대입하면 케이블에서 소비되는 전력을 계산할 수 있게 된다. 상관관계를 나타내는 식 (9)는 MSRC 내부에 평면파를 해석할 때 등장하는 식으로 공진기 내부 필드를 표현하기에 적합하다.

$$\rho_c^z(r) = \frac{\langle E_z(\vec{r}_1) E_z^*(\vec{r}_2) \rangle}{\sqrt{\langle |E_z(\vec{r}_1)|^2 \rangle \langle |E_z(\vec{r}_2)|^2 \rangle}}$$
(9)

$$P_{mean} = \left\langle \left| e^{(\alpha+j\beta)(l+2h)} Q(0) - \rho_2 e^{-(\alpha+j\beta)(l+2h)} P(l+2h) \right|^2 \right\rangle \times$$

$$\frac{\text{Re}[Z_c(1+\rho_1)(1-\rho_1^*)]}{2 \left[ e^{2\alpha(l+2h)} + |\rho_1 \rho_2|^2 e^{-2\alpha(l+2h)} - 2 \text{Re}(\rho_1 \rho_2 e^{-2j\beta(l+2h)}) \right]}$$
(10)

식 (9)를 이용하면 두 개 전계 성분의 앙상블(ensemble)인 평균 곱을 계산할 수 있고, 식 (10)에 포함된  $\langle |Q(0)|^2 \rangle$ ,  $\langle |P(l+2h)|^2 \rangle$ ,  $\langle |P(l+2h)| Q^*(0) \rangle$ 의 계산을 풀어내는데 중요한 역할을 한다. 상관관계 해석에서는  $\sin(x)/x$ 와 같은 꼴의 삼각함수 적분이 포함되어 함수

가 발산하기 때문에 이중적분을 수행하기 위해서 참고문헌 [1]에 있는 근사 표현식을 사용한다.

또한, 상관관계 함수를 이용하여 유도전류의 양을 계산할 때에는 벽면에서 가까이 케이블이 있을 경우, 벽면에 의해 반사된 전자파를 고려해야 한다. 벽면과의 거리 기준은 파장이  $\lambda$ 일 때 벽면으로부터 케이블의 거리가  $\lambda/4$ 보다 클 경우, 먼 거리로 정의한다. 위에 언급된 식들은 참고문헌 [2]에서 자세하게 확인할 수 있다.

### III. 시뮬레이션 결과

그림 1과 같은 케이블에 유기되는 전류를 계산할 때, 케이블은 벽면(접지면)으로부터 높이  $h$ 인 3 cm에 위치하고, 케이블의 길이가 50 cm이다. 케이블 양 끝단에 위치해 있는 부하  $Z_0$ 와 케이블의 임피던스 모두 50  $\Omega$ 로 해석환경을 구성하였다. 임의의 방향에서 입사되는 평면파의 크기가 1 V/m 일 경우를 해석하였다. 계산한 전류의 값에 대한 검증용 위해 그림 1과 같은 환경을 얻을 수 있는 공진기 구조를 CST를 이용하여 그림 2처럼 설정하였다. 설계된 CST 시뮬레이션은 공진기 내부에 케이블과 모드스터가 존재하고, 공진기 상단에 존재하는 개구면에서 바로 평면파가 입사하는 전자파 환경이다. 상용시뮬레이션과 상관관계 함수를 이용하여 케이블에 유기되는 전류를 계산하고, 두 결과를 비교하여 그림 3에 나타냈다.

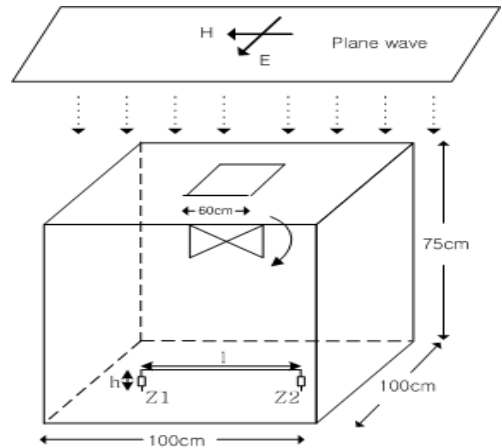


그림 2. CST 시뮬레이션 전자파 환경

Fig. 2. The electromagnetic environment for CST simulation.

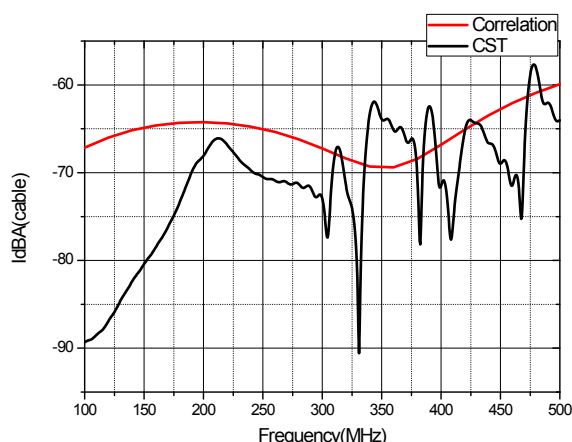


그림 3. 케이블에 흐르는 전류

Fig. 3. The induced currents on the cable for comparison

그림 3은 100 MHz부터 500 MHz까지 전자파가 케이블에 입사했을 때 케이블에 유도되는 전류를 나타낸다. 케이블의 길이가 50 cm일 때, 150 MHz에서  $1/4 \lambda$ 가 되므로 이 부근의 근처에서 전류의 크기가 증가되는 것을 확인할 수 있으며, 마찬가지로 500 MHz로 주파수가 올라갈수록 케이블의 길이가  $\lambda$ 에 가까워져 높은 유도 전류가 생기는 것을 확인할 수 있다. 그림 3의 빨간 선은 상관관계 함수를 이용한 결과이고, 검은 선은 CST 시뮬레이션 결과이다. CST 시뮬레이션에서 모델링한 공진기 구조와 이상적인 MSRC 구조를 반영한 상관관계 함수 결과사이에서 공진기의 크기로 인한 공진점과 저주파 영역의 오차가 존재하지만, 전류의 경향이 200 MHz 이상에서 두 시뮬레이션의 경향이 비슷하게 나타나는 것을 확인할 수 있다.

#### IV. 결 론

본 논문에서는 MSRC 내의 전자기파가 케이블에 미치는 영향으로 볼 수 있는 전류를 계산하였다. 대형 구조물

해석과 케이블과 같은 소형 구조물의 해석을 동시에 하기는 현재 상용시뮬레이션으로 쉽지 않다. 본 논문에서 제시한 상관관계 함수를 이용한다면 대형 구조물 내의 다양한 케이블에 유겨된 전류를 이용하여 각 부하에 생기는 전력을 구할 수 있고, 이 결과는 전자기기의 안정성을 평가하는 방법의 보조 역할로 사용할 수 있음을 제시하였다.

#### References

- [1] D. Hill, *Electromagnetic Fields in Cavities: Deterministic and Statistical Theories*, IEEE Press, 2009.
- [2] I. Junqua, J. P. Parmantier, and P. Degauque, "Field-to-wire coupling in an electrically large cavity: A semi-analytic solution", *IEEE Trans. EMC*, vol. 52, no. 4, pp. 1034-1040, Nov. 2010.
- [3] D. A. Hill, "Boundary fields in reverberation chambers", *IEEE Trans. EMC*, vol. 47, no. 2, pp. 281-288, May 2005.
- [4] I. Junqua, F. Issac, and J. -P. Parmantier, "A network formulation of the power balance method for high frequency coupling", *Electromagnetics*, vol. 25, no. 7, pp. 603-622, Oct. 2005.
- [5] B. L. Michielsen, C. Fiachetti, "Covariance operator, green functions and canonical stochastic electromagnetic fields", *Radio Science*, vol. 40, no. 5, pp. 1-12, 2006.
- [6] D. A. Hill, "Plane wave integral representation for fields in reverberation chambers", *IEEE Trans. Electromagn. Compat.*, vol. 40, no. 3, pp. 209-217, Aug. 1998.
- [7] C. Fiachetti, B. Michielsen, "Electromagnetic random field models for analysis of coupling inside mode turned chambers", *Electron. Lett.*, vol. 39, no. 24, Nov. 2003.