

# Stratton-Chu 공식을 이용한 측정된 근거리장에서 원거리장으로의 변환에 관한 연구

## A Study on Near-Field to Far-Field Transformation Using Stratton-Chu Formula

이정석 · 송태림 · 두진경 · 구태완 · 육종관

Jeong-Seok Lee · Tae-Lim Song · Jin-Kyoung Du · Tae-Wan Koo · Jong-Gwan Yook

### 요 약

본 논문에서는 안테나의 원거리장 특성 및 Electromagnetic Compatibility(EMC) testing을 위한 근거리 원거리장 변환에 대한 연구이다. EMC testing은 광대역 신호 및 거대 구조에 대한 원거리장 측정과 같은 복잡한 과정이 필요하다. EMC 측정 문제를 해결하기 위해, Stratton-Chu 공식을 이용하여 간단하고 직접적인 방법으로 원거리장을 예측하였다. 특히 Stratton-Chu 공식을 이용한 예측은 자유 공간상의 평면파를 통해 해석값을 비교하여 유효성을 검증했다. 패치 안테나의 근거리장 추출과 원거리장 확인을 위해, full-wave 시뮬레이션을 이용하여 Stratton-Chu 계산 결과를 비교 및 검증하였으며, 6 % 이내의 오차로 원거리장의 크기를 예측했다.

### Abstract

This paper deals with the near-field to far-field calculation for far-field characteristics of antenna and electromagnetic compatibility(EMC) testing. Since the conventional EMC testing process is inefficient such as measurements of the wide band signals and mega structures, Stratton-Chu formula is used to predict the far-field emission by simple and direct process. The usefulness of Stratton-Chu formula is verified by comparing to the analytic solution of the uniform distribution aperture in free-space. In order to inspect the far-fields and to get the near-field values, full-wave simulation solver is utilized. Through the full-wave simulation about the patch antenna, calculated far-field results from Stratton-Chu formula are proven. The predicted magnitudes of the far-field are in error by less than 6 %.

Key words : Near-Field to Far-Field Transformation, Stratton-Chu Formula

### I. 서 론

근거리장에서 원거리장으로의 변환은 안테나 방사 특성 및 EMC 규격 테스트 등을 예측하는데 사용되고 있다<sup>[1]</sup>. 최근의 안테나 연구는 이동통신과 위성 통신의 발달로 소형, 경량, 박막형의 구조에 대한 연

구와 고효율, 광대역, 고성능의 특성에 대한 요구가 급증하고 있다. 이러한 안테나에 대한 성능을 확인하기 위한 측정방법은 넓은 대지와 주위 환경이 측정에 적합한 지역적인 제한이 있으므로 1950년대 근거리장 측정과 관련한 연구를 통해 외부 환경에 영향을 받지 않고 측정이 가능한 방법들을 연구하기

「본 연구는 방위사업청과 국방과학연구소의 지원으로 수행되었음.」

연세대학교 전기전자공학과(Department of Electrical & Electronic Engineering, Yonsei University)

· Manuscript received November 30, 2012 ; Revised February 19, 2013 ; Accepted February 20, 2013. (ID No. 20121130-075)

· Corresponding Author : Jong-Gwan Yook (e-mail : jgyook@yonsei.ac.kr)

시작했다<sup>[2]</sup>. 안테나뿐만 아니라 EMC 규격 테스트 역시 자동차, 비행기와 같은 거대 구조에 대한 해석이 필요함에 따라 수십 미터 크기의 무반사실에서 원거리장 측정을 하고 있다. 측정 주파수 대역 또한 확장하고 있어 매우 복잡하고 번거로운 측정 과정이 필요하며, 시간적, 공간적, 비용적 문제가 있다.

간접적으로 원거리장을 예측하는 대안으로 근거리장 측정을 통한 원거리장을 예측하는 방법이 있다. 근거리장 측정을 위해 near-field scanner가 가장 널리 사용되고 있다. Near-field scanner는 device under test(DUT)로부터 발생하는 방사 전자기를 PC 모니터 상에 그래프, 분포도, 조감도 등으로 표시해 방사 전자기를 한 눈에 파악할 수 있도록 해주는 측정 장비이다. DUT로부터 일정한 거리를 두고 다양한 위치에서 field probe와 스펙트럼 분석기(spectrum analyzer)를 이용하여 측정된 근거리장은 원거리장 변환을 통해 EMC 규격 테스트 결과를 예측할 수 있다. 기존의 근거리장을 이용한 원거리장 예측은 안테나의 원거리장 특성을 예측하기 위해 주로 사용되었다<sup>[4]~[8]</sup>. 안테나의 방사가 집중되는 가상의 면에서 near-field scanner를 이용하여 측정된 근거리장은 원거리장을 계산하는데 사용됐다.

본 논문에서는 Stratton-Chu 공식을 이용하여 기존에 사용된 식보다 원거리장의 계산 효율을 높였다. 또한, 자유 공간상을 진행하는 평면파를 이용하여 Stratton-Chu 공식의 유효성을 검증하고, 패치 안테나의 근거리장을 원천(source)으로 원거리장을 예측했다.

## II. Stratton-Chu 공식

$$\vec{J}(\vec{r}') = \hat{n} \times \vec{H}(\vec{r}') \quad (1)$$

$$\vec{A}(\vec{r}) = \frac{1}{4\pi} \iint \vec{J}(\vec{r}') g(\vec{r}, \vec{r}') ds' \quad (2)$$

$$g(\vec{r}, \vec{r}') = \frac{e^{-jk|\vec{r}-\vec{r}'|}}{4\pi|\vec{r}-\vec{r}'|} \quad (3)$$

$$\vec{E} = -j\omega\mu\vec{A}(\vec{r}) + \frac{1}{j\omega\epsilon} \nabla(\nabla \cdot \vec{A}(\vec{r})) \quad (4)$$

식 (1)~(4)는 근거리 원거리장 변환에 사용된 기존의 식이며, 근거리장 측정을 통해 얻은 전자기장을 등가 전류 밀도( $\vec{J}$ )로 바꿔 원거리장을 계산하는

방식이다<sup>[6]~[11]</sup>. 사용된 수식에서  $\vec{r}$ 은 관찰점에서의 좌표이며,  $\vec{r}'$ 은 원천에서의 좌표 값이다. 식 (1)은 측정된 자기장을 등가 전류 밀도로 바꾸는 과정이다. 근거리장을 원천으로 사용하지 않고, 근거리장을 측정된 면에서 분포하는 가상의 전류 밀도를 원천으로 계산한다. 식 (2)는 등가 원천에서 발생하는 벡터 포텐셜( $\vec{A}$ )을 자유 공간상의 임의의 위치에서 표현한 식이고, 식 (3)은 자유 공간상의 Green's 함수이다. 식 (4)는 벡터 포텐셜을 이용해 임의의 위치에서 원거리 전기장을 계산하는 식이다. 이 방법은 식 (4)에서 보는 바와 같이, 적분식에 대한 발산(divergence)과 기울기(gradient) 계산이 포함되어 있어 복잡하다. 또한, 등가 전류 밀도와 벡터 포텐셜을 이용하여 원거리장을 구하는 번거로운 과정이 필요하다. 실제 Matlab을 이용하여 발산과 기울기를 계산하는 경우 일반 사칙연산에 비해 8~10배 정도 시간이 걸리는 문제가 있다. 이에 요즘은 finite-difference time-domain(FDTD) 혹은 fast Fourier transform(FFT)와 같은 방법을 이용하여 계산을 단축하고 있다. 하지만 이와 같은 방법은 짧은 계산시간 대신에 정확성이 떨어지는 문제가 있다<sup>[12]</sup>.

$$\begin{aligned} \vec{E}(\vec{r}) = & \iint_s j\omega\mu[\hat{n} \times \vec{H}(\vec{r}')] g(\vec{r}, \vec{r}') \\ & + [\hat{n} \times \vec{E}(\vec{r}')] \times \nabla g(\vec{r}, \vec{r}') \\ & + [\hat{n} \cdot \vec{E}(\vec{r}')] \nabla g(\vec{r}, \vec{r}') da' \end{aligned} \quad (5)$$

$$\begin{aligned} \vec{H}(\vec{r}) = & \iint_s -j\omega\epsilon[\hat{n} \times \vec{E}(\vec{r}')] g(\vec{r}, \vec{r}') \\ & + [\hat{n} \times \vec{H}(\vec{r}')] \times \nabla g(\vec{r}, \vec{r}') \\ & + [\hat{n} \cdot \vec{H}(\vec{r}')] \nabla g(\vec{r}, \vec{r}') da' \end{aligned} \quad (6)$$

하지만 식 (5), (6)에서 나타냈듯이 본 논문에서 사용된 Stratton-Chu 공식은 Green's 함수에 대한 기울기 계산 이외에 복잡한 계산이 없다<sup>[10],[11]</sup>. 또한, 등가 전류 밀도와 벡터 포텐셜을 이용한 복잡한 과정 없이 측정된 근거리장을 바로 원거리장으로 계산한다는 장점이 있다. 하지만 Stratton-Chu 공식을 이용할 경우 DUT를 포함하는 폐곡면에서 근거리장의 값이 필요하다. 직육면체의 형태로 근거리장을 측정할 경우 매우 많은 측정 및 계산이 필요하다. 그러나 대부분의 DUT는 충분한 접지면이 있기 때문에 방사되는

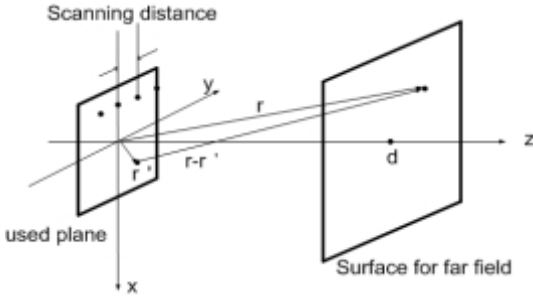


그림 1. 평면 근거리장 스캔  
Fig. 1. Planar near-field scanning.

근거리장은 한 쪽 면에 집중된다. 따라서 Stratton-Chu 공식을 이용한 원거리장 계산은 근거리장이 집중된 한 면에서 계산하기 때문에 EMC testing에서 원거리장 크기를 예측하는데 효율적으로 사용할 수 있다.

그림 1은 측정된 근거리장을 이용하여 원거리장을 계산하는 과정이다. 근거리장이 집중된 면에서 동일한 간격으로 스캔한 값은 식 (5), (6)을 이용하여 원거리의 임의의 평면에서 원거리장을 구할 수 있다. 이때 스캔한 값은 x, y, z 방향 성분별로 근거리장의 크기 및 위상 값이 필요하다.

### III. Stratton-Chu 공식을 이용한 해석 검증

$$E_r = H_r = 0 \tag{7a}$$

$$E_\theta = \frac{C}{2} \sin \phi (1 + \cos \theta) \frac{\sin X}{X} \frac{\sin Y}{Y} \tag{7b}$$

$$E_\phi = \frac{C}{2} \cos \phi (1 + \cos \theta) \frac{\sin X}{X} \frac{\sin Y}{Y} \tag{7c}$$

$$H_\theta = -\frac{E_\phi}{\eta} \tag{7d}$$

$$H_\phi = -\frac{E_\theta}{\eta} \tag{7e}$$

$$X = \frac{ka}{2} \sin \theta \cos \phi \tag{7f}$$

$$Y = \frac{kb}{2} \sin \theta \cos \phi \tag{7g}$$

$$C = j \frac{abkE_0 e^{-jkr}}{2\pi r} \tag{7h}$$

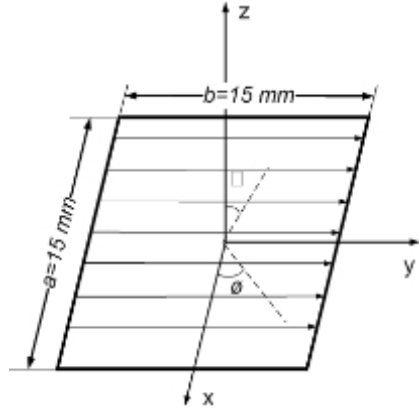
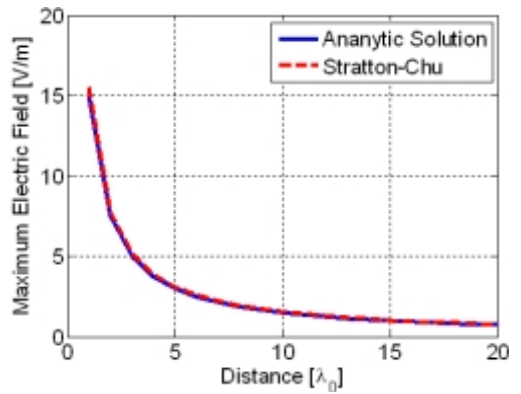
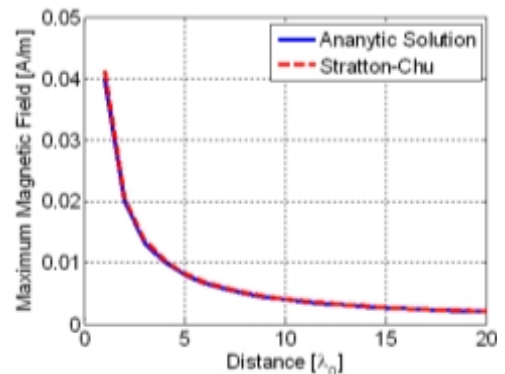


그림 2. 개구를 통과한 평면파의 분포  
Fig. 2. Uniform distribution aperture in free-space.



(a) 전기장  
(a) Electric field



(b) 자기장  
(b) Magnetic field

그림 3. 이론적 해석값과 Stratton-Chu 공식 계산의 원거리장 크기 비교

Fig. 3. Comparison of the maximum far-field values for the analytic solution and Stratton-Chu formula calculation.

식 (7a)~(7h)는 그림 2와 같은 개구를 통과한 평면파를 자유 공간상에서 계산한 식이다<sup>[13]</sup>. 식 (7a)~(7h)를 통해 얻은 해석 값은 Stratton-Chu 공식 계산 결과를 검증하는데 사용하였다. 해석값의 경우, y 방향으로 편파된 377 V/m 전기장과 -x 방향으로 편파된 1 A/m 자기장의 평면파를 이용했다. 이 때 평면파는 15 mm×15 mm의 개구에서 방사되며, Stratton-Chu 공식의 경우, 2 GHz에서 동일한 간격(0.0067  $\lambda_0$ )으로 추출한 값을 이용해 계산했다. 이는 Simpson's  $\frac{1}{3}$  rule을 만족시키기 위해  $\lambda/5$ 보다 작은 간격으로 값을 추출했다.

그림 3은 해석값과 Stratton-Chu 공식을 비교한 결과이다. 원거리장의 값이 3.4 % 이내의 오차로 거의 일치하였으며, 원거리장의 크기가 거리에 반비례한 특성을 확인할 수 있다. 이는 식 (3)의 자유공간상의 Green's 함수의 특성을 반영한 결과이다. 이를 통해 Stratton-Chu 공식의 유효성을 확인할 수 있다.

#### IV. Stratton-Chu 공식을 이용한 패치 안테나의 원거리장 예측 및 분석

실제 EMC 테스트가 필요한 DUT를 이용하여 원거리장을 예측해야 하지만, 실제 DUT는 복잡한 구조와 시뮬레이션 시간이 오래 걸리는 문제가 있다. 또한, 단순한 구조의 경우에는 원거리까지 방사량이 적어 시뮬레이션 값과 비교가 어렵다. 따라서 실제 DUT를 대신해서 간단한 구조로 원거리까지 방사할 수 있는 패치 안테나를 이용하여 원거리장의 값을 계산했다.

그림 4는 사용된 패치 안테나의 구조 및 방사 특성이다. 사용된 패치 안테나는 2 GHz에서 주로 방사되며, 충분한 접지면을 확보하고 있기 때문에 접지면의 반대쪽 면으로 방사가 집중되는 특징이 있다. 이런 특징은 Stratton-Chu 공식에 의한 계산을 간단히 할 수 있다.

그림 5는 패치 안테나의 중심 주파수에서의 근거리장 분포이다. Full-wave 시뮬레이션에서 패치 안테나로부터 0.033  $\lambda_0$  떨어진 190 mm×290 mm 크기의 직사각형에서 0.0067  $\lambda_0$  간격으로 근거리장의 값을 추출하였다. 근거리장의 x, y, z 성분을 크기와 위상으로 각각 나누어 추출하여 원거리장을 계산하는 원

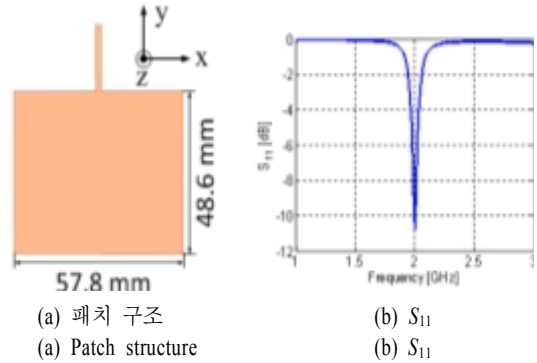


그림 4. 직사각형 패치 안테나  
Fig. 4. Rectangular patch antenna.

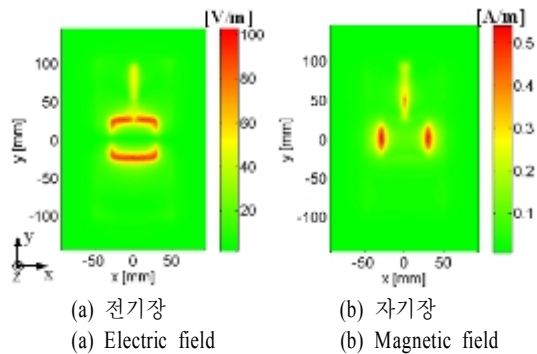


그림 5. 패치 안테나의 근거리장 분포  
Fig. 5. Near-field distribution of the rectangular patch antenna.

천으로 이용하였다. 또한, 전기장 분포의 경우, 안테나의 공진 부분과 전원이 입력되는 feeding line에서 강한 특징을 확인할 수 있다.

그림 6은 패치 안테나로부터  $\lambda_0$  떨어진 거리에서 필드 분포를 full-wave 시뮬레이션과 Stratton-Chu 공식 계산 결과이다. 원거리장 역시 근거리장과 같은 크기의 직사각형에서 필드를 계산했다. Full-wave와 Stratton-Chu 공식을 이용한 계산을 비교한 결과, field 분포, 최댓값, 최댓값의 위치가 유사함을 확인할 수 있다. 또한, 그림 5에서 패치 안테나의 공진 부분과 feeding line의 영향으로 그림 6에서 field가 y축으로 길게 분포됨을 확인할 수 있다. 그림 6(e), (f)는 full-wave 시뮬레이션 결과와 Stratton-Chu를 이용한 결과의 오차를 계산한 결과이다. 최댓값이 위치하는 중앙 부분에는 오차가 매우 작은 반면에, 가장자리에서 큰 오차를 확인할 수 있었다. 이는 full-wave 시

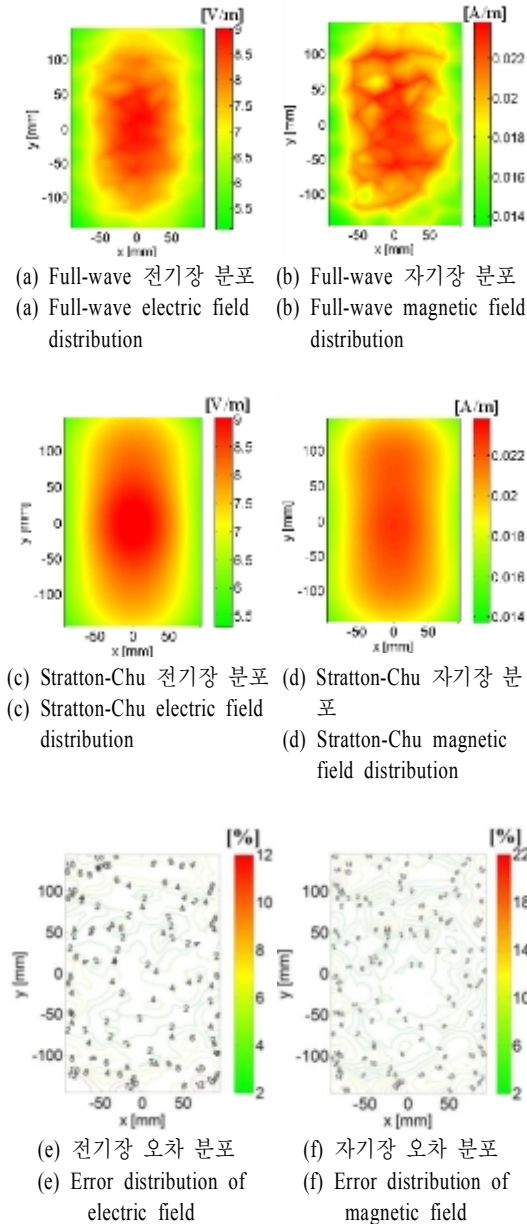


그림 6.  $\lambda_0$ 에서 field 분포  
Fig. 6. Field distribution at the distance of  $\lambda_0$ .

물레이션의 경계 특성으로 인해 대부분의 오차가 분포함을 확인할 수 있다.

패치 안테나로부터 거리가 멀어질수록 원거리장은 평면파의 형태에 가까워지며, 거리에 따른 원거리장의 최대 크기는 그림 7에서와 같은 결과를 얻을 수 있다. 이로부터 그림 3과 같이 거리에 반비례해서 원거리장의 크기가 감소함을 확인할 수 있다. 또

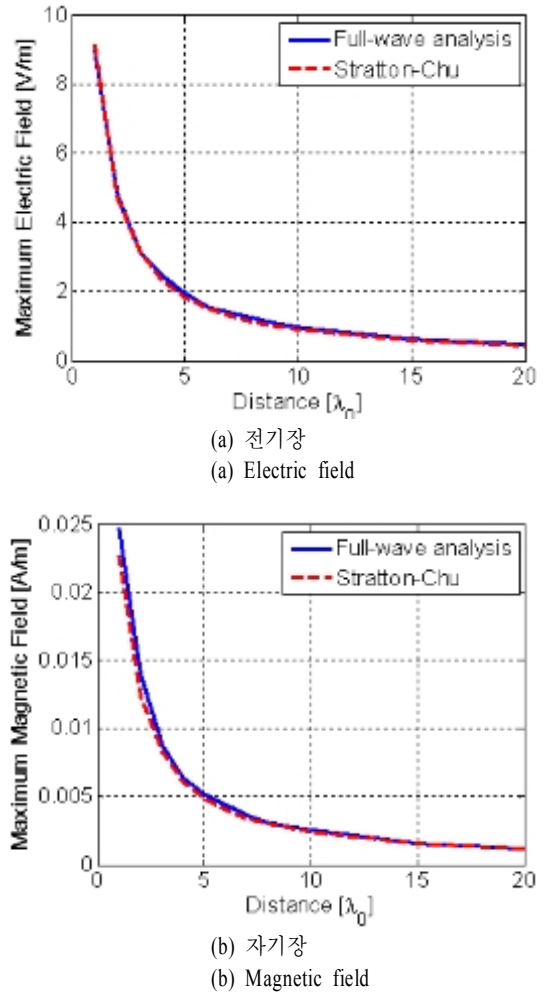


그림 7. Full-wave 시뮬레이션과 Stratton-Chu 원거리장 크기 비교  
Fig. 7. Comparison of the maximum far-field values for full-wave analysis and Stratton-Chu formula.

한  $4\lambda_0 \sim 8\lambda_0$  거리를 제외하고 full-wave 시뮬레이션과 Stratton-Chu 공식 계산 결과가 유사함을 확인할 수 있다.  $4\lambda_0$  이하 거리에서는 추출된 근거리장과의 거리가 매우 작기 때문에 오차가 작지만 거리가 멀어질수록 오차가 커지는 경향을 보인다. 그러나  $8\lambda_0$  이상에서는 거의 완전한 평면파의 형태를 보이며, 크기의 변화가 작기 때문에 오차가 작아지는 경향을 볼 수 있다.

표 1과 2는 거리에 따른 full-wave 시뮬레이션과 Stratton-Chu 공식 계산을 이용한 오차를 나타낸 표이다. 두 결과 모두 Green's 함수의 영향으로 최대 크

표 1. Full-wave 시뮬레이션과 Stratton-Chu 공식 계산으로 얻은 최대 전기장 값의 비교

Table 1. Comparison of full-wave simulation and Stratton-Chu formula calculation results of the maximum electric field.

거리	시뮬레이션	Stratton-Chu	오차
5 $\lambda_0$	1.940 V/m	1.830 V/m	0.5 %
10 $\lambda_0$	0.955 V/m	0.921 V/m	3.6 %
20 $\lambda_0$	0.470 V/m	0.467 V/m	0.6 %

표 2. Full-wave 시뮬레이션과 Stratton-Chu 공식 계산으로 얻은 최대 자기장 값의 비교

Table 2. Comparison of full-wave simulation and Stratton-Chu formula calculation results of the maximum magnetic field.

거리	시뮬레이션	Stratton-Chu	오차
5 $\lambda_0$	0.0052 A/m	0.0049 A/m	5.8 %
10 $\lambda_0$	0.0025 A/m	0.0024 A/m	4.0 %
20 $\lambda_0$	0.0012 A/m	0.0012 A/m	0.0 %

기가 거리에 반비례하는 특성을 확인할 수 있다. 또한, 2 GHz를 기준으로 20  $\lambda_0$ (3 m) 이상에서는 0.6 % 이하의 오차를 갖는 것을 확인할 수 있다. 따라서 수십 미터 떨어진 거리에서 원거리장을 측정하는 EMC testing의 경우에는 매우 작은 오차로 원거리장을 예측할 수 있을 것으로 기대된다.

## V. 결 론

본 논문에서는 원거리장을 직접 측정할 때 발생하는 문제를 해결하기 위해, 근거리 원거리장 변환을 이용한 원거리장 예측을 수행하였다. 안테나의 원거리장을 예측하기 위해 사용된 기존의 방식은 등가 전류 밀도를 이용한 복잡한 계산 때문에 원거리장을 곧바로 구하기 힘든 단점이 있다. 하지만 Stratton-Chu 공식을 이용할 경우, 적분식에 대한 발산과 기울기 계산이 없는 간단한 계산과정으로 쉽게 계산할 수 있으며, 평면파의 근거리장을 원천으로 사용하기 때문에 원거리장을 바로 구할 수 있었다. 패치 안테나의 근거리장은 full-wave 시뮬레이션을 이용하여 추출했으며, Stratton-Chu 공식을 이용해 원거리장을 계산했다. 거리에 따른 최대 원거리장의 크기

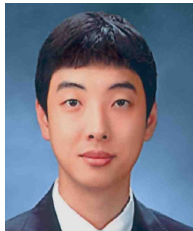
는 Green's 함수의 특성에 의해 거리에 반비례함을 확인할 수 있었으며, 4~8  $\lambda_0$  거리를 제외하고 거리가 멀어질수록 full-wave 시뮬레이션과 Stratton-Chu 공식 계산 결과가 비슷해지는 경향성을 확인했다. 시뮬레이션 여건을 고려한 3 m 거리에서 원거리장 예측 역시 0.6 % 이하의 오차로 예측할 수 있었으며, 실제 EMC 규격 테스트를 고려하여 수십 미터로 거리가 멀어질 경우 Stratton-Chu 공식을 이용한 원거리장 예측은 오차율을 줄일 수 있는 좋은 방법이다. 또한, 추후 연구에는 이미지법을 활용하여 완전 도체 바닥인 EMC 테스트 측정 환경에 대한 예측과 실제 측정된 근거리장을 활용하여 연구 결과의 신뢰성을 높일 수 있는 연구를 진행할 계획이다.

## 참 고 문 헌

- [1] Andriy Radchenko, Ji Zhng, Keong Kam, and David Pommerenke, "Numerical evaluation of near-field to far-field transformation robustness for EMC", *IEEE Int. Symp. Electromagnetic Compatibility*, pp 605-611, Aug. 2012.
- [2] Edward B. Joy, "A brief history of the development of the near-field measurement technique at the georgia institute of technology".
- [3] C. I. S. P. R. Publ. 22: Information technology equipment radio disturbance characteristics limits and methods of measurement IEC, Edition 5:2005.
- [4] Tapan Kumar Sarkar, Fellow, IEEE, and Ardalan Taaghjol, "Near-field to near/far-field transformation for arbitrary near-field geometry utilizing an equivalent electric current and MoM", *IEEE Trans. on Antennas and Propagation*, vol. 47, no. 3, pp. 566-573, Mar. 1999.
- [5] Peter Petre, Tapan K. Sarkar, and Fellow, IEEE, "Planar near-field to far-field transformation using an equivalent magnetic current approach", *IEEE Trans. on Antennas and Propagation*, vol. 40, no. 11, pp. 1348-1356, Nov. 1992.
- [6] A. C. Newell, "Error analysis techniques for planar near-field measurements", *IEEE Trans. Antennas Propagation*, vol. AI-36, pp. 754-768, Jun. 1988.

- [7] S. Ponnappolli, T. K. Sarkar, and P. Petre, "Near-field to far-field transformation using an equivalent current approach", in *Proc. Int. Conf. Antennas Propagation*, London, Ontario, Jun. 1991.
- [8] T. K. Sarkar, P. Petre, A. Taaghoul, and R. F. Harrington, "An alternate spherical near-field to far-field transformation", *Progress in Electromagnetic Research*, Boston, MA: EMW, pp. 268-284, vol. 16, 1997.
- [9] R. F. Harrington, *Time-Harmonic Electromagnetic Fields*, John Wiley & Sons, Inc., pp. 95-134, 2001.
- [10] J. A. Stratton, L. J. Chu, "Diffraction theory of electromagnetic waves", *Physical Review*, vol. 56, no. 1, pp. 99-107, Jul. 1939.
- [11] Chen-To Tai, "Kirchhoff theory: scalar, vector, or dyadic?", *IEEE Trans. on Antennas and Propagation*, vol. 20, no. 1, pp. 114-115, Jan. 1972.
- [12] Shaolin Liao, Ronald J. Vernon, "A new fast algorithm for calculating near-field propagation between arbitrary smooth surfaces", *IEEE Conf. on Infrared and Millimeter Waves & 13th Intl.*, 606-607, Sep. 2005.
- [13] C. A. Balanis, *Antenna theory: Analysis and Design*, Third Edition, John Wiley & Sons, Inc., pp. 653-738, 2005.

이 정 석



2009년 2월: 홍익대학교 전자전기 공학부 (공학사)  
 2011년 7월~현재: 연세대학교 전기전자공학과 (공학석사)  
 [주 관심분야] EMI/EMC

두 진 경



2005년 2월: 연세대학교 전기전자공학과 (공학사)  
 2007년 2월: 연세대학교 전기전자공학과 (공학석사)  
 2007년 2월~2010년 3월: 삼성전자 DMC 연구소  
 2010년 3월~현재: 연세대학교 전기전자공학과 박사과정  
 [주 관심분야] Multiscale EM analysis, EMT, EMI/EMC

송 태 립



2003년 2월: 경희대학교 전파공학과 (공학사)  
 2005년 2월: 연세대학교 전기전자공학과 (공학석사)  
 2005년 1월~2010 9월: LG전자 시스템 IC 사업팀  
 2010년 9월~현재: 연세대학교 전기전자공학과 박사과정  
 [주 관심분야] EMI/EMC/SI/PI analysis

구 태 완



2009년 2월: 한국의국어대학교 전자공학과 (공학사)  
 2011년 2월: 연세대학교 전기전자공학과 (공학석사)  
 2011년 3월~현재: 연세대학교 전기전자공학과 박사과정  
 [주 관심분야] 광대역/다중대역 안테나, EMI/EMC

육 중 관



1987년: 연세대학교 전자공학과 (공학사)

1989년: 연세대학교 전자공학과 (공학석사)

1998년: University of Michigan 전기공학과 (공학박사)

1997년 1월~1998년 10월: University of Michigan Research Fellow

1998년 11월~1999년 2월: Qualcomm Inc. Senior Engineer

1999년 3월~2000년 2월: 광주과학기술원 조교수

2000년 3월~현재: 연세대학교 전기전자공학과 교수

[주 관심분야] 수치 해석, 바이오 센서, 마이크로파 구조 해석 및 설계, RF MEMS, 박막 공진 구조, EMI/EMC, HEMP, 플라즈마 해석