

극소 다이폴 모델링 및 최소자승법을이용한 능동 배열안테나의 근접전계 빔패턴 재구성 및 합성방법

Reconstruction and Synthesis of Near-Field Beam Patterns of Active Antenna Arrays via Infinitesimal Dipole Modeling and the Least Square Method

김 영 담 · 박 준 민 · 양 성 준*

Young-Dam Kim · Jun-Min Park · Sung-Jun Yang*

요 약

무선전력 전송이나 6G와 같은 미래지향 통신에서는 근접장에서의 에너지 및 신호의 전달 효율성을 극대화 하기 위해 대형 배열안테나를 사용한다. 따라서 배열안테나의 근접전계 빔패턴에 대한 해석은 매우 중요한 연구분야이다. 본 논문에서는 배열안테나의 극소 다이폴 모델링을 이용하여 해석이 어려운 근접전계 빔패턴을 자유자재로 정확하고 효율적으로 재구성 하는 방법을 제안한다. 먼저 측정 또는 시뮬레이션을 통해 획득한 원전계 능동소자패턴으로 부터 극소 다이폴 모델링을 수행 하여 극소 다이폴 모델링에 배열안테나의 상호결합현상을 반영한다. 원전계 능동소자패턴으로 부터 획득한 다이폴 모델의 전류분포에 각각에 대해 미리 설정된 관측영역에 대해 전자기파 재방사를 수행하여 근접전계 능동소자패턴을 획득할 수 있다. 그 후 해당 근접전계 능동소자 패턴과 근접전계 빔패턴을 형성하는 빔계수와와의 조합을 통해 자유자재로 원하는 근접전계 빔패턴을 정확하게 해석하는 방법을 제안하였다. 이때 빔패턴을 재구성하는 빔계수는 최소자승법 및 마스크를 도입하여 효율적으로 빔계수를 도출할 수 있는 방법을 제안하였다. 획득한 빔계수를 이용하여 근접전계 빔패턴을 원하는 모양으로 합성 할 수 있다. 제안하는 방법은 12 다이폴 선형 배열안테나의 시뮬레이션을 예로 들어 자세히 설명하였다.

Abstract

In future-oriented communication, such as wireless power transmission or 6G, large array antennas are used to maximize energy and signal transmission efficiency in the near field. Therefore, the analysis of the near-field beam pattern of an array antenna is a very important research field. In this paper, we propose a method to accurately and efficiently reconstruct the near-field beam pattern, which is difficult to analyze, using the infinitesimal dipole modeling (IDM) of an array antenna. First, IDMs are extracted from the active element pattern (AEP) of the far-field acquired through measurement or simulation, and the mutual coupling effect of the array antenna is reflected in the IDM. Near-field active element patterns (NAEP) can be obtained by performing electromagnetic wave re-radiation for an observation area preset for each of the current distributions of IDMs. Subsequently, a method to easily and accurately analyze the desired near-field electric beam pattern through the combination of the corresponding NAEP and beam coefficient is proposed. Moreover, a method to efficiently extract the beam coefficients using the least squares method and a mask is proposed. Using the obtained beam coefficients, a near-field beam pattern can be synthesized into the desired shape. The proposed method is described in detail using a simulation of a 12-dipole linear array antenna as an example.

Key words: Near-Field, Reconstruction, Large Antenna Array, Infinitesimal Dipole Modeling, Active Element Pattern

「본 연구는 대한민국 정부(산업통상자원부 및 방위사업청) 제원으로 민간협력진흥원에서 수행하는 민간기술협력사업의 연구비 지원으로 수행되었습니다(21-CM-RA-02).」

충남대학교 전자공학과(Department of Electronics Engineering, Chungnam University)

*스위스 취리히연방공과대학(Swiss Federal Institute of Technology (ETH) University)

· Manuscript received October 18, 2021 ; Revised November 2, 2021 ; Accepted November 25, 2021. (ID No. 20211018-094)

· Corresponding Author: Jun-Min Park (e-mail: jm_park@cnu.ac.kr)

I. 서 론

근접전계 포커싱(NFF, near-field focusing) 안테나는 많은 분야에서 다양한 연구가 이루어지고 있다^[1]. 특히 송수신 안테나가 근접전계 영역에 서로 위치하는 상황에서는 두 안테나가 원전계에 있을 때에 비해 통신신호 또는 에너지 전달 효율이 매우 좋다. 이러한 근접전계 포커싱을 위해 일반적으로 배열 안테나를 사용한다. 배열 안테나의 각 소자별 위상 조절을 통해 원하는 근접장 영역에 보강간섭을 발생시키고, 에너지를 집중시켜 신호 및 에너지 전달 효율성을 극대화시킬 수 있다. 일반적으로 배열 안테나 빔포밍으로 알려져 있는 원거리장 포커싱(far-field focusing)의 경우, 필드의 변화가 거리에 따라 발생하지 않고 관측 각에 따라 발생하므로 원하는 특정 관측 각에서 보강간섭을 발생시키면 된다. 하지만, 근접장 포커싱의 경우 전자기 필드의 변화가 거리에 따라 매우 급변하므로 이를 이용하여 특정 관측각이 아니라 3차원의 특정 공간영역에 에너지 집중이 가능하다^{[2]~[6]}.

특히 무선전력 전송 참고문헌 [7]~[10]이나 6G와 같은 미래지향 통신에서는 근접장에서의 에너지 및 신호의 전달 효율성을 극대화 하기 위해 대형 배열안테나를 사용하며, 주파수 또한 높은 주파수 대역을 사용하는 추세이다. 일반적인 원전계 거리는 $2D^2/\lambda$ (D : 안테나 크기, λ : 파장) 이상의 거리로 표현할 수 있다. 여기서 현재 연구 동향에 맞추어 D 는 점차 커지며 λ 는 매우 작아지므로 원전계 거리가 매우 증가함을 알 수 있다. 만일 실내환경에서의 무선전력전송 혹은 통신을 고려한다면 근접전계 포커싱이 앞으로 매우 중요한 개념이 될 것으로 예측된다.

앞서 언급하였듯이 안테나의 근접전계는 원전계와 다르게 거리에 따라 전자기 필드가 급변하는 양상을 보인다. 따라서 이를 정확하게 해석하는 것이 필수적이고, 이를 위해서는 MoM(method of moment), FDTD(finite difference time domain)와 같은 전자기파 수치해석 시뮬레이션(full-wave simulation)을 이용해 정밀하게 분석해야만 한다. 하지만 크게 두 가지 어려움이 있다. 첫째, 원전계에 비해 근접전계는 3차원 공간상에 샘플링된 수많은 점들에 대해 전계를 획득해야 한다. 둘째, 대형 배열안테나의 근접전계 포커싱을 위해 각 소자의 빔 계수를 다양하게

변화시켜야 하고, 매번 수치해석 시뮬레이션을 수행하여 근접전계를 분석하기에 매우 어려움이 있다.

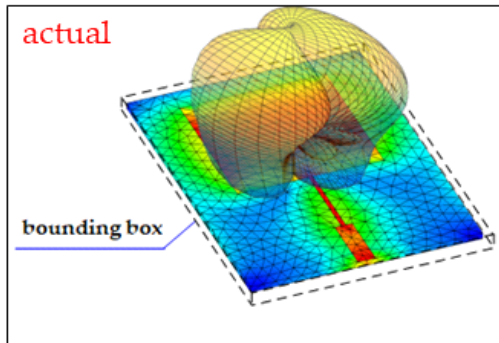
본 논문에서는 위의 문제점을 해결하기 위해 극소 다이폴 모델링(IDM, infinitesimal dipole modeling) 개념을 도입한다. 극소 다이폴 모델링이란 특정 임의의 안테나를 주파수 도메인에서 극소 다이폴 배열로 모델링하는 방법이다^{[11]~[14]}. 극소 다이폴 모델링을 위해서는 그 안테나의 원전계 패턴 혹은 근전계 패턴이 필요하다. 어떤 임의의 안테나의 극소 다이폴 모델이란 그 모델내의 전류분포의 방사가 모델링하고자 하는 그 안테나의 원전계 혹은 근전계 패턴을 동일하게 재방사시킬 수 있는 모델을 의미한다. 또한 측정된 원전계 패턴뿐만 아니라, 측정된 근접전계 패턴을 이용하여 극소 다이폴 모델링을 수행할 수 있다. 이러한 경우에도 해당 극소 다이폴 모델을 이용하여 원하는 임의의 관측 영역의 근접전계 및 원전계를 정확하게 예측할 수 있다. 이러한 경우는 원전계 거리가 확보되지 않아 원전계 측정시설을 사용할 수 없는 대형 배열안테나 혹은 대형안테나에 효율적으로 적용이 가능하다.

또한 앞서 언급한 두 번째 문제는 재구성과 관련된 문제로 본 논문에서는 1회의 원전계 시뮬레이션 혹은 측정 패턴을 이용하여 배열 안테나의 빔계수 변화에 따라 변하는 결과를 자유자재로 재구성하고자 한다. 이를 위해 극소 다이폴 모델링에 사용된 원전계 시뮬레이션 패턴은 능동소자패턴(AEP, active element pattern) 개념을 도입한다. AEP란 배열안테나에서 특정 소자만 키우고 나머지 소자의 경우를 중단시키거나 끈 경우에 측정된 안테나 패턴을 의미한다. 이렇게 한 경우, 능동소자를 중심으로 배열 안테나의 상호결합현상이 완벽하게 반영된 패턴을 획득할 수 있다. 즉, 모든 소자에 대해 각 소자별 AEP를 획득하고, 여기에 빔계수를 적용하면 배열 안테나의 상호결합현상을 완벽하게 반영한 빔패턴을 중첩의 원리를 통해 정확하게 해석할 수 있다.

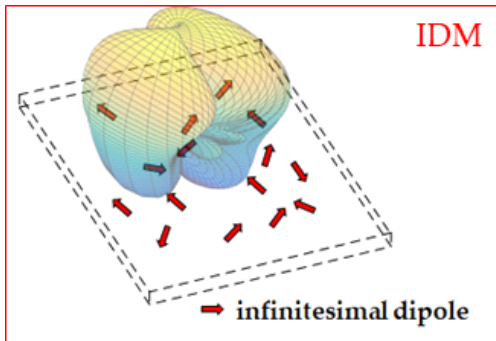
2장에서는 능동 소자패턴을 이용한 극소 다이폴 모델링에 대해 설명하였으며, 3장에서는 근접전계 재구성 및 최소자승법을 이용한 근접전계 빔합성 방법 및 이를 설명하기 위한 시뮬레이션 결과에 대해 기술하고자 하며, 4장에서는 결론을 나타내었다.

II. 극소 다이폴 모델 방사 및 추출

그림 1(a)와 같이 임의의 안테나가 있다고 가정하자. 이때 임의의 안테나의 원전계 혹은 근접전계 방사패턴을 시뮬레이션 혹은 측정을 통해 미리 알고 있다고 생각하자. 이때 특정 안테나의 알고 있는 방사패턴을 이용하여 그림 1(b)와 같이 임의의 안테나를 극소 다이폴 전류들의 배열로 모델링할 수 있다. 이것을 특정 안테나의 극소 다이폴 모델이라고 정의할 수 있다. 맥스웰 방정식의 해의 유일성에 의해서 특정 **bounding box** 내에서 실제 안테나와 그 안테나의 극소 다이폴 모델은 동일한 방사패턴을 제공하므로 실제 안테나와 극소 다이폴 모델은 수학적으로 일치한다고 볼 수 있다. 이러한 극소 다이폴 모델링을



(a) 임의의 안테나의 전류분포 및 방사패턴
(a) Current distribution and radiation pattern of an arbitrary antenna



(b) 위 안테나의 극소 다이폴 모델 및 방사패턴
(b) Infinitesimal dipole model of the antenna and radiation pattern

그림 1. 극소 다이폴 모델링 개념도

Fig. 1. Concept of IDM.

이용하면 임의의 안테나의 측정 혹은 시뮬레이션 패턴을 통해 동일한 방사패턴을 만들어 내는 극소 다이폴 전류의 배열을 추출할 수 있고, 이러한 극소 다이폴 모델은 임의의 안테나를 급수형태로 표현한 것이 된다. 획득한 극소 다이폴 모델의 전류 분포에 대한 전계를 재방사시켜 안테나 패턴을 자유자재로 재구성할 수 있게 된다.

그림 1(b)와 같이 극소 다이폴 모델은 극소 다이폴 전류들의 배열로 이루어지며 극소 다이폴의 총 개수는 N 으로 가정하자. 중첩의 원리에 의해 극소 다이폴 전류분포는 식 (1)과 같이 나타낼 수 있다.

$$\bar{J}_{ID}(\bar{r}) = \sum_{n=1}^N \bar{p}_n \delta(\bar{r} - \bar{r}_n) \quad (1)$$

여기서 \bar{p}_n 은 각 n 번째 극소 다이폴의 복소 전류 벡터를 나타낸다. \bar{r} 은 특정 관측점의 거리벡터를 나타내며, \bar{r}_n 은 n 번째 극소 다이폴의 위치벡터를 나타낸다. 극소 다이폴이므로 델타 함수를 통해 수학적으로 간단하게 표현이 가능하다.

이러한 \bar{J}_{ID} 를 알때 벡터 자기 포텐셜 및 그린함수 개념을 활용하여 전계분포를 쉽게 구할 수 있다. 또한 극소 다이폴 모델에 포함된 델타함수로 인해 복잡한 적분수식이 간단하게 정리될 수 있고, 극소 다이폴 전류분포에 의한 방사전계는 식 (2)와 같이 나타낼 수 있다. 식 (2)를 통해 특정 관측벡터 \bar{r} 상의 전계분포(근접전계 및 원전계)를 쉽게 구할 수 있다.

$$\bar{E}(\bar{r}) = \sum_{n=1}^N \frac{1}{j4\pi\omega\epsilon} \times \left[k^2 \left((\bar{n}_n \times \bar{p}_n) \times \bar{n}_n \right) \frac{e^{-jk r_n}}{r_n} + \left(3\bar{n}_n (\bar{n}_n \cdot \bar{p}_n) - \bar{p}_n \right) \left(\frac{jk e^{-jk r_n}}{r_n^2} + \frac{e^{-jk r_n}}{r_n^3} \right) \right] \quad (2)$$

여기서 $e^{j\omega t}$ 의 time convention을 가정하였고 ω 는 각주파수, ϵ 은 유전율, k 는 파수(wave number)이다. $r_n = |\bar{r} - \bar{r}_n|$ 으로 관측위치와 n 번째 극소다이폴 사이의 거리를 나타낸다. 또한 \bar{n}_n 은 식 (3)과 같이 정의된다.

$$\bar{n}_n = \frac{\bar{r} - \bar{r}_n}{r_n} \quad (3)$$

특히 식 (2)에서 대괄호 내부의 $1/r_n$ 에 비례하는 전자는 원전계 성분에 해당한다. 대괄호 내부의 $1/r_n^2, 1/r_n^3$ 에 비례하는 후자는 근접전계 성분에 해당한다.

앞서서 극소 다이폴 모델의 방사에 대해 설명하였다. 극소 다이폴 모델의 방사수식을 이용하여 최적화 문제를 통해 극소 다이폴 모델을 추출할 수 있다. 극소 다이폴 모델의 추출 단계는 아래 세개의 단계를 통해 설명할 수 있다.

1. 추출하고자 하는 실제 안테나의 측정 및 시뮬레이션 전계 방사패턴을 확보한다. 근접전계 혹은 원전계 모두 가능하다. 본 논문에서는 원전계 패턴을 사용하였다.
2. 1에서 얻어진 전계분포를 식 (2)의 $\bar{E}(\bar{r})$ 로 사용한다. 이때 본 논문에서는 원전계 패턴을 이용하여 극소 다이폴 모델을 추출하므로 $1/r_n^2, 1/r_n^3$ 해당하는 성분을 제거하고, $1/r_n$ 에 해당하는 성분만을 이용한다.
3. 최적화 과정을 통해 \bar{r}_n 및 \bar{p}_n 을 추출한다.

여기서 사용 가능한 최적화 알고리즘 및 방향은 매우 다양하고 원하는 응용 분야에 맞게 극소 다이폴 모델을 추출할 수 있다. 본 논문에서는 \bar{r}_n 을 특정 위치로 고정하여 최적화 변수를 축소하였다. 그 후 식 (2)를 행렬식 기반의 수식으로 변환 후 \bar{p}_n 을 추출하는 형태로 진행하였다. 즉, 정리하면 실제 안테나의 원전계 패턴을 이용하여 미리 정해진 위치 \bar{r}_n 위에 각각에 대응되는 복소벡터 \bar{p}_n 을 추출하였다.

III. 근접전계 능동소자 패턴 및 근접전계 재구성

3-1 배열 안테나의 원전계 능동소자 패턴을 이용한 극소 다이폴 모델링

본 논문에서 사용한 배열안테나 구조는 그림 2와 같다. 배열안테나 구조의 상세사항은 그림에 나타내었다. 해당 배열안테나의 단위소자 안테나의 중심주파수는 2 GHz로 설계되었다. 우선 시뮬레이션을 통해 그림 2와 같은 구조

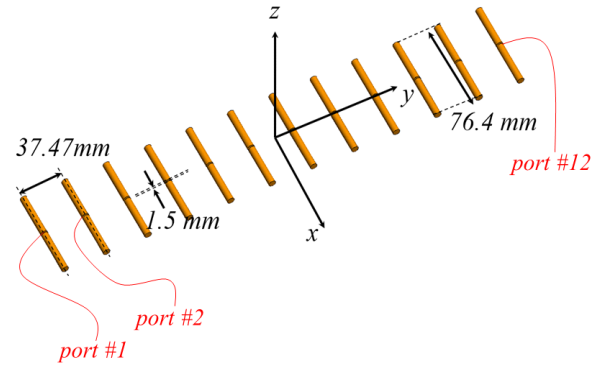
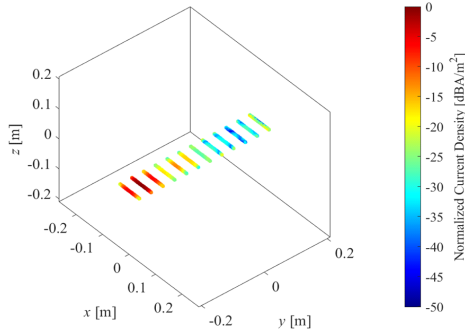


그림 2. 12×1 반파장 다이폴 배열안테나 구조
Fig. 2. 12×1 dipole array-antenna structure.

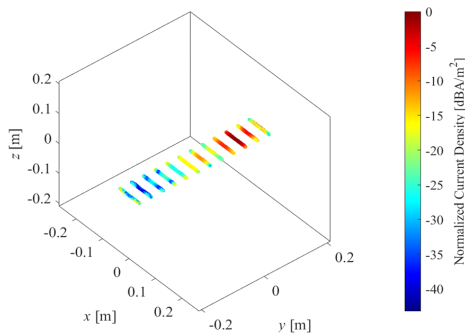
의 배열안테나의 원전계 능동소자 패턴을 획득하였다. 해당 시뮬레이션은 FEKO 시뮬레이션 툴의 모멘트법(MoM)을 이용해 수행되었다. 여기서 능동소자패턴이란 특정 소자만 전원을 인가하고 나머지 소자의 전원을 끈 상태에서 측정된 패턴이다. 이러한 능동소자패턴은 해당 능동소자 기준으로 주변 안테나 소자들간 상호결합현상을 완벽히 반영한 패턴을 의미한다. 총 12번의 시뮬레이션을 통해 port #1~port #12의 개별 능동에 대한 12개의 능동소자 패턴을 획득하였다.

획득한 원전계 능동소자 패턴은 방위각 기준 $0^\circ \sim 180^\circ$ 범위, 고각 기준 $0^\circ \sim 360^\circ$ 범위에 대해서 3° 및 5° 간격으로 추출되었다. 이때 측정된 패턴이 있다면 측정된 패턴을 시뮬레이션 패턴으로 대체하여도 된다. 시뮬레이션을 통해 얻어진 원전계 능동소자패턴의 전계분포를 식 (2)의 $\bar{E}(\bar{r})$ 로 사용한다. 이때 식 (2)에서 $1/r_n$ 에 해당하는 성분만을 사용하고, 고정된 \bar{r}_n 위치에 대해서 \bar{p}_n 을 추출하였다. 이때 \bar{p}_n 은 극소 다이폴 전류분포 벡터에 해당한다.

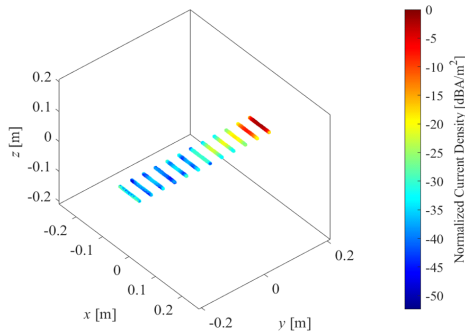
그림 3에는 원전계 능동소자패턴으로 부터 추출된 극소 다이폴 모델의 정규화된 전류분포 결과를 나타내었으며, 이는 \bar{p}_n 의 정규화된 크기를 그래프로 나타낸 것과 같다. 그림 3(a)~그림 3(c)는 각각 2번, 10번, 12번 포트만 능동인 경우의 원전계 능동소자패턴을 이용한 극소 다이폴 모델링 결과이며, 능동이 된 포트 주변의 전류분포가 제일 우세하게 나타남을 확인할 수 있고, 제안한 극소 다이폴 모델링이 유효함을 증명하는 결과이다.



(a) 12개 소자들 중 2번째 소자만 능동
(a) Only port #2 is active of the 12 elements



(b) 12개 소자들 중 10번째 소자만 능동
(b) Only port #10 is active of the 12 elements



(c) 12개 소자들 중 2번째 소자만 능동
(c) Only port #12 is active of the 12 elements

그림 3. 원전계 능동소자패턴으로 부터 추출된 극소 다이폴 모델의 정규화된 전류분포 결과

Fig. 3. Normalized current distribution of IDM extracted by the active element pattern in far-field.

3-2 추출된 극소 다이폴 모델의 재방사를 이용한 근접전계 능동소자패턴의 정의

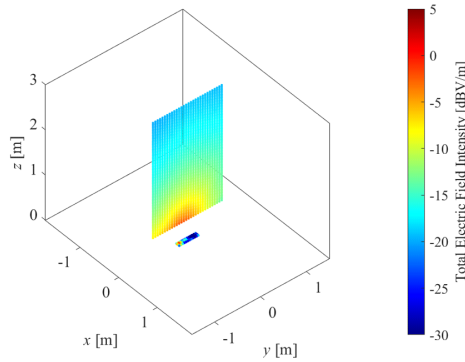
본 논문에서의 목표는 원전계 능동소자패턴을 이용하여 극소 다이폴 모델을 추출하고, 해당 극소 다이폴 모델을 이용하여 원하는 임의의 영역에 대한 근접전계를 재구성하고 사용하는데 목적이 있다. 특히 원전계 능동소자패턴은 원전계에서 정의되어 있지만, 배열안테나의 상호결합 현상을 잘 모델링한 결과이며, 이를 이용한 극소 다이폴 모델링 또한 배열 안테나의 상호결합현상을 반영한 안테나 모델링이 된다. 즉, 이러한 극소다이폴 모델을 사용하여 근접전계 패턴을 재구성하는 경우, 해당 근접전계 패턴은 근접전계 능동소자패턴 (NAEP: near-field active element pattern)이라고 정의할 수 있다.

특히 근접전계를 추출하는 영역을 근접전계 그리드라고 정의할 수 있는데, 원전계와는 다르게 근접전계는 3차원 영역에 정의가 되어 있고, 관심있는 근접전계 영역을 상세하게 보고 싶을 경우 많은 데이터가 필요하게 된다. 극소 다이폴 모델을 아는 경우 재방사한 근접전계는 이전 단계에서 획득한 \bar{p}_n 과 식 (2)를 통해 쉽게 계산할 수 있다. 이때 \bar{r} 은 그림 4(a)와 같이 사용자가 설정하여 나타낸 재방사할 근접전계 그리드를 의미한다. 그림 4(a)~그림 4(c)는 각각 그림 3(a)~그림 3(c)에서 나타낸 극소 다이폴 모델을 이용하여 관측하고자 하는 근접전계 그리드로 재방사하여 형성한 근접전계 능동소자 패턴이 된다.

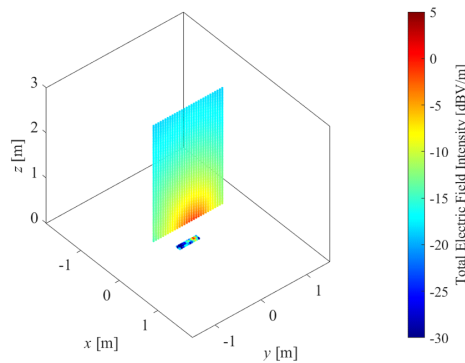
3-3 근접전계 능동소자패턴을 이용한 근접전계 패턴의 재구성

먼저 총 M 개 소자로 구성된 배열안테나의 m 번째 소자가 능동이 된 경우의 근접전계 능동소자패턴을 $\bar{E}_m^{NAEP}(\bar{r})$ 로 정의하자. 이때 각 소자별로 인가되는 복소 빔계수를 c_m 이라고 하면 이러한 복소 빔계수가 소자별로 인가되어 결합된 최종 근접전계 패턴은 아래의 식으로 계산할 수 있다.

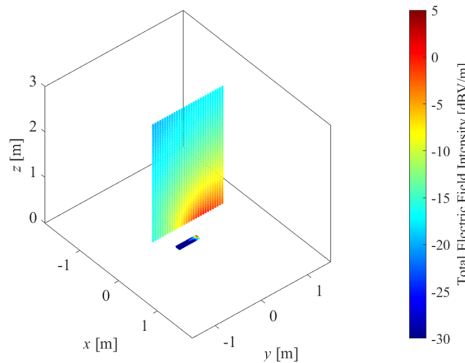
$$\bar{E}(\bar{r}) = \sum_m^M c_m \bar{E}_m^{NAEP}(\bar{r}) \quad (4)$$



(a) 12개 소자들 중 2번째 소자만 능동
(a) Only port #2 is active of the 12 elements



(b) 12개 소자들 중 10번째 소자만 능동
(b) Only port #10 is active of the 10 elements



(c) 12개 소자들 중 12번째 소자만 능동
(c) Only port #12 is active of the 12 elements

그림 4. 그림3에서 나타난 극소 다이폴 모델의 재방사를 통해 획득한 근접전계 능동소자패턴
Fig. 4. NAEP obtained by re-radiation of IDM in Fig. 3.

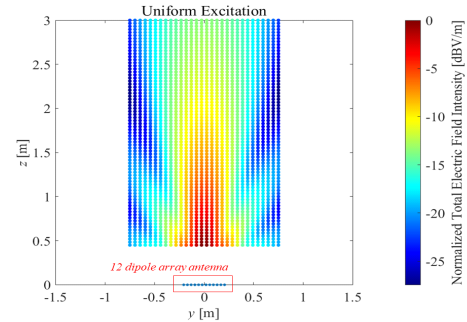


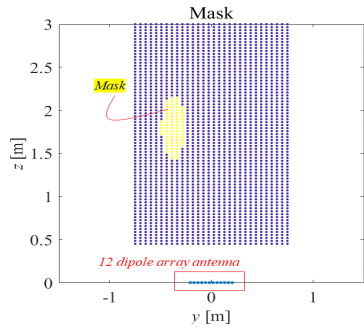
그림 5. 동일 빔계수 인가시 재구성된 근접전계 패턴
Fig. 5. Reconstructed near-field pattern for uniform excitation.

그림 5는 식 (4)를 이용하고 c_m 을 모두 1로 설정하고 재구성한 근접전계 패턴을 나타내었다. 여기서 사용한 근접전계 능동소자 패턴은 그림 4(a)~그림 4(c)에서 나타난 결과와 동일한 방법으로 추출된 총 12개의 근접전계 능동소자패턴을 이용하였다. 원전계 빔패턴과 유사한 형태지만 근접전계 고유의 빔패턴이 형성됨을 확인할 수 있다. 이때 제안하는 식 (4)의 신뢰도는 참고문헌 [15]를 통해 자세히 나타내었으며, MoM과 비교하였을때 식 (4)가 계산적으로 효율적이면서도 정확하다.

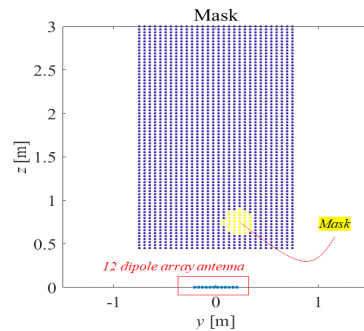
3-4 최소자승법 및 마스크를 이용한 근접전계 빔패턴 합성법

식 (4)를 이용하여 근접전계 빔패턴을 정확하게 자유자재로 재구성하는 방법에 대해 이전에 설명하였다. 본 절에서는 원하는 근접전계 영역에 포커싱할 수 있는 빔계수인 c_m 을 도출하는 방법에 대해 설명하고자 한다. 먼저 근접전계 포커싱을 수행할 마스크를 정의하고 마스크 영역을 설정해야 한다. 본 논문에서 마스크란 배열안테나의 근접전계 영역 중 전계강도를 최대로 하고 싶은 특정 영역을 의미한다.

그림 6에서는 그림 4에서 근접전계 능동소자 패턴을 추출한 관심 영역 중 전계강도를 최대로 하고 싶은 임의의 영역을 마스크로 표현하였다. 마스크는 타원 형태로 두 가지 케이스에 대해서 설정하였다. 마스크 설정시 λ 는 2 GHz 주파수의 자유공간 파장으로 $\lambda=15$ cm이다. 첫 번째 케이스의 마스크는 그림 6(a)와 같다. 해당 마스크의



(a) 1번 케이스에 대한 마스크
(a) Mask for case1



(b) 2번 케이스에 대한 마스크
(b) Mask for case2

그림 6. 근접전계 포커싱을 위한 마스크
Fig. 6. Mask for near-field focusing.

중심은 $y = -2.5 \lambda$, $z = 12 \lambda$ 로 설정하였고, y 축 및 z 축 반경은 각각 0.8λ , 2.5λ 로 설정하였다. 두번째 케이스의 마스크는 그림 6(b)와 같다. 해당 마스크의 중심은 $y = 1.5 \lambda$, $z = 5 \lambda$ 으로 설정하였고, y 축 및 z 축 반경은 각각 1λ , 1λ 로 설정하였다.

본 절에서는 c_m 을 추출하는 것이 핵심이다. 식 (4)를 행렬식으로 변환하면 식 (5)와 같다.

$$E = E^{\text{NAEP}} c \quad (5)$$

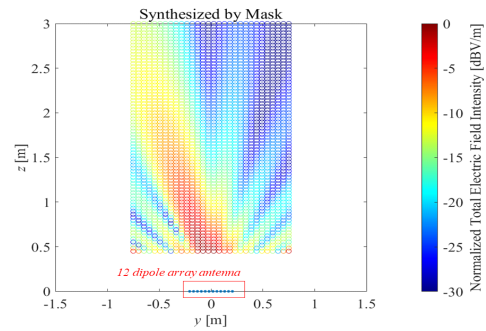
여기서 E 는 $K \times 1$ 벡터로 K 는 근접전계를 관측하는 모든 포인트의 개수를 의미한다. E^{NAEP} 는 $K \times M$ 행렬로 근접전계를 관측하는 모든포인트에 대해 각 소자별로 이루어진 근접전계 능동소자패턴을 배치한 행렬을 의미한다. c 는 $M \times 1$ 벡터로 각 소자별 빔계수를 의미한다.

우리는 원하는 E 를 만들기 위한 c 를 추출하는 것이 목적이므로 식 (5)를 최소자승법을 통해 풀면 식 (6)과 같다.

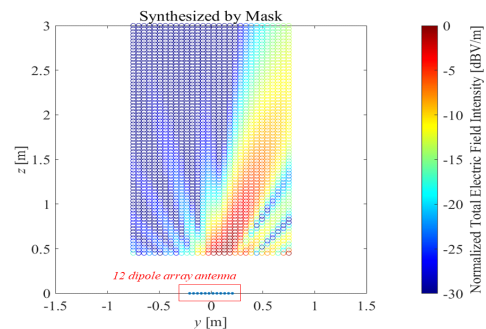
$$c = [(E^{\text{NAEP}})^H E^{\text{NAEP}}]^{-1} (E^{\text{NAEP}})^H E_{\text{mask}} \quad (6)$$

여기서 $(\cdot)^H$ 은 Hermitian 연산자로 행렬의 Transpose 및 Complex Conjugate 연산을 합친 연산자이다. E_{mask} 는 마스크 패턴으로 그림 6에서 설정한 패턴으로 대체가 된다. 예를 들어 총 K 개의 인덱스 중 그림 6(a)의 노란색 부분에 해당하는 관측점 인덱스에만 1을 채우고, 나머지 인덱스 영역은 0을 채워 만든 벡터를 쉽게 마스크를 생성할 수 있다. E^{NAEP} 는 앞 절에서 12개의 다이폴 안테나에 대해서 획득 후 저장되어 있는 근접전계 능동소자패턴 결과를 행렬로 변환하여 쉽게 생성할 수 있다. 최종적으로 c 를 식 (6)을 이용하여 추출 할 수 있으며, 본 논문에서는 MATLAB의 LSQR 함수를 이용하여 계산하였다.

그림 7은 각 케이스별로 추출된 c 를 활용하여 근접전



(a) 1번 케이스 마스크에 대한 빔합성 결과
(a) Beam synthesis result for case1 mask



(b) 2번 케이스 마스크에 대한 빔합성 결과
(b) Beam synthesis result for case2 mask

그림 7. 그림 6의 마스크에 대한 근접전계 빔합성 결과
Fig. 7. Results of near-field beam synthesis for masks of Fig. 6.

계 빔패턴을 합성한 결과를 나타내었다. 그림 6에서 설정한 마스크에 해당하는 영역에 최대로 전계를 형성하는 결과를 확인할 수 있다.

IV. 결 론

본 논문에서는 배열안테나의 극소 다이폴 모델링을 이용하여 해석이 어려운 근접전계 빔패턴을 자유자재로 재구성하는 방법을 제안하였다. 해석에 사용된 배열안테나는 2 GHz의 중심주파수를 가지는 반파장 다이폴 소자 12개를 선형으로 배치한 안테나를 사용하였다. 먼저 시뮬레이션을 통해 획득한 12개의 원전계 능동소자패턴으로 부터 극소 다이폴 모델링을 수행하여 극소 다이폴 모델링에 배열안테나의 상호결합현상을 반영하였다. 원전계 능동소자패턴(AEP)으로 부터 획득한 12개의 극소 다이폴 모델의 전류분포에 각각에 대해 미리 설정된 관측영역에 대해 전자기파 재방사를 수행하여 근접전계 능동소자패턴(NAEP)을 획득하였다. 그 후 해당 근접전계 능동소자패턴과 근접전계 빔패턴을 형성하는 빔계수와의 조합을 통해 자유자재로 원하는 근접전계 빔패턴을 정확하게 해석하는 방법을 제안하였다. 여기서 빔계수는 마스크 및 최소자승법을 이용한 행렬식 기반의 추출방법을 제안하였고, 이를 활용하여 근접전계 빔패턴을 합성하는 방법에 대해서도 설명하였다.

References

- [1] P. Nepa, A. Buffi, "Near-field-focused microwave antennas: Near-field shaping and implementation," *IEEE Antennas Propagation Magazine*, vol. 59, no. 3, pp. 42-53, Jun. 2017.
- [2] M. Fairouz, M. A. Saed, "A complete system of wireless power transfer using a circularly polarized retrodirective array," *Journal of Electromagnetic Engineering and Science*, vol. 20, no. 2, pp. 139-144, Apr. 2020.
- [3] H. T. Chou, N. N. Wang, H. H. Chou, and J. H. Qiu, "An effective synthesis of planar array antennas for producing near-field contoured patterns," *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, vol. 59, no. 9, pp. 3224-3233, Sep. 2011.
- [4] A. Razavi, R. Maaskant, J. Yang, Z. Šipuš, and M. Viberg, "Optimal aperture distribution for maximum power transfer in planar lossy multilayered matters," in *2015 9th European Conference on Antennas and Propagation(EuCAP)*, Lisbon, Apr. 2015.
- [5] K. D. Stephan, J. B. Mead, D. M. Pozar, L. Wang, and J. A. Pearce, "A near field focused microstrip array for a radiometric temperature sensor," *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, vol. 55, no. 4, pp. 1199-1203, Apr. 2007.
- [6] M. Bogosanovic, A. G. Williamson, "Microstrip antenna array with a beam focused in the near-field zone for application in noncontact microwave industrial inspection," *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, vol. 56, no. 6, pp. 2186-2195, Dec. 2007.
- [7] R. Van der Linden, H. J. Visser, "Analysis, design and realization of a near-field focused RF power transfer system," *Journal of Physics: Conference Series*, vol. 476, no. 1, pp. 1-5, Dec. 2013.
- [8] R. S. Yu, H. Liu, and L. Li, "Design of near-field focused metasurface for high-efficient wireless power transfer with multifocus characteristics," *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 66, no. 5, pp. 3993- 4002, May. 2019.
- [9] Z. Nie, Y. Yang, "A model independent scheme of adaptive focusing for wireless powering to in-body shifting medical device," *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, vol. 66, no. 3, pp. 1497-1506, Mar. 2018.
- [10] G. V. Borgeotti, "Maximum power transfer between two planar apertures in the Fresnel zone," *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, vol. 14, no. 2, pp. 158-163, Mar. 1966.
- [11] S. M. Mikki, A. A. Ksihk, "Theory and applications of infinitesimal dipole models for computational electromagnetics," *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, vol. 54, no. 5, pp. 2764-2775, May. 2007.

- [12] T. S. Sijher, A. A. Kishk, "Antenna modeling by infinitesimal dipoles using genetic algorithms," *Progress in Electromagnetics Research*, vol. 52, pp. 225-254, 2005.
- [13] S. Clauzier, S. Mikki, and Y. Antar, "Design of near-field synthesis arrays through global optimization," *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, vol. 63, no. 1, pp. 151-165, Jan. 2015.
- [14] S. J. Yang, Y. D. Kim, D. J. Yun, D. W. Yi, and N. H. Myung, "Antenna modeling using sparse infinitesimal dipoles based on recursive convex optimization," *IEEE Antennas Wireless Propagation Letters*, vol. 17, no. 4, pp. 662-665, Apr. 2018.
- [15] S. J. Yang, Y. D. Kim, "An accurate near-field focusing of array antenna based on near-field active element pattern and infinitesimal dipole modeling," *IEEE Access*, vol. 9, pp. 143771-143781, Oct. 2021.

김 영 담 [충남대학교/조교수]

<https://orcid.org/0000-0002-3855-8902>



2011년 2월: 아주대학교 전자공학과 (공학사)

2013년 2월: 한국과학기술원 전기 및 전자공학과 (공학석사)

2017년 2월: 한국과학기술원 전기 및 전자공학과 (공학박사)

2017년 3월~2018년 3월: 삼성전자 네트워크사업부 책임연구원

2018년 3월~2019년 2월: 한국과학기술원 박사후연구원

2019년 3월~2021년 2월: 국방과학연구소 선임연구원

2021년 3월~현재: 충남대학교 전자공학과 조교수

[주 관심분야 Antenna Modeling, Electromagnetic Numerical Analysis 등]

양 성 준 [취리히연방공과대학/연수연구원]

<https://orcid.org/0000-0002-7821-6237>



2014년 2월: 한국과학기술원 전기 및 전자공학부 (공학사)

2019년 2월: 한국과학기술원 전기 및 전자공학부 (공학박사)

2019년 3월~2020년 8월: 한국과학기술원 정보전자연구소 연수연구원

2020년 11월~현재: 스위스 취리히연방공과대학 정보기술 및 전자공학부 연수연구원

[주 관심분야 Computational Electromagnetics, Antenna Modeling, and Electromagnetic Exposure Assessment 등]

박 준 민 [충남대학교/조교수]

<https://orcid.org/0000-0002-1441-8796>



2007년 2월: 광운대학교 정보제어공학과 (공학사)

2019년 2월: 포항공과대학교 전자전기공학과 (공학박사)

2019년 2월~2021년 2월: 포스코 기술연구원 책임연구원

2021년 3월~현재: 충남대학교 전자공학과 조교수

[주 관심분야 Automatic Control, Sampled-Data System, Linear System 등]