

# 전기적 소형 Folded Slot Spherical Helix 자기 다이폴 안테나에 관한 연구

## Investigation of Electrically Small Folded Slot Spherical Helix Magnetic Dipole Antenna

신건영 · 공명준 · 이수현 · 윤익재

Geonyeong Shin · Myeongjun Kong · Su-Hyeon Lee · Ick-Jae Yoon

### 요 약

본 논문에서는 FSSH(Folded Slot Spherical Helix) 자기 다이폴 안테나에 관한 추가적인 연구를 통해 안테나 시작품 제작에 용이성을 갖는 구조를 제안하고, 그 방사 특성을 분석하였다. FSSH 자기 다이폴 안테나의 folded element 개수와 그 사이 간의 거리 및 금속면의 두께를 조절하여 전기적 소형 크기에서 높은 효율을 유지하면서 상대적으로 간소화된 안테나 구조를 제안하였다. 시뮬레이션을 통해 제안된 안테나의 넓은 고효율 대역폭 특성을 non-Foster 정합회로를 통해 실질적으로 사용할 수 있음을 확인하였다. SLS(Selective Laser Sintering) 3D 프린팅 기술을 통해 안테나 시작품을 제작 및 측정하였다. 측정값은 구리 테이프 경계면의 높은 저항 손실로 인해 시뮬레이션에 비해 낮은  $Q$  값 특성을 보인다.

### Abstract

In this paper, we propose an FSSH(Folded Slot Spherical Helix) magnetic dipole antenna with a form factor easy to build and study its radiation properties. The number of folded arms, the gap between them and the metal thickness are tuned to achieve relatively simple structure to realize whereas maintaining high radiation efficiency at an electrically small size. The proposed design shows wide radiation efficiency bandwidth and it is confirmed by circuit simulation that the non-Foster impedance matching techniques could be utilized for its practical use. The prototype of the proposed antenna is built with the aid of an SLS(Selective Laser Sintering) 3D printing technology. The measured result shows lower  $Q$  impedance characteristic due to high resistive loss of the copper tape joints.

Key words: Electrical Small Antennas, Radiation Quality Factor, Non-Foster Matching, 3D Printing Technology

### I. 서 론

최근 전기적 소형 안테나(Electrically Small Antenna: ESA)의 무선통신, 무선전력전송, 센서 등 다양한 분야에서의 활용을 위한 연구가 진행 중이다. 이러한 ESA의 성

능 지표로 방사 quality factor  $Q$  값이 활용될 수 있으며, 전기적 크기  $ka$ ( $k$ : 자유공간에서의 전파상수,  $a$ : 안테나의 구조를 둘러싸는 가상의 구의 반지름)에 따른 이론적 방사 하부 한계치  $Q_b$ 가 존재한다<sup>[1]</sup>. 이후 Thal은, 이 하부 한계치는  $TM_{10}$  방사모드 전기 다이폴의 경우  $1.5Q_b$ ,  $TE_{10}$

「이 연구는 2015학년도 충남대학교 대학 연구비의 지원으로 연구되었음(Grant No. 2015-1873-01).」

충남대학교 전기공학과(Department of Electrical Engineering, Chungnam National University)

· Manuscript received February 21, 2017 ; Revised March 24, 2017 ; Accepted March 30, 2017. (ID No. 20170221-08S)

· Corresponding Author: Ick-Jae Yoon (e-mail: ijyoon@cnu.ac.kr)

방사모드 자기 다이폴의 경우  $3.0Q_b$ 로 존재함을 밝혔으며<sup>[2]</sup>, 이러한 이론적 하부 한계치에 근접하면서 높은 방사효율 특성을 보이는 ESA 구현에 관한 다양한 형태의 연구 결과가 발표되었다<sup>[3]~[5]</sup>. 하지만 대부분의 경우, 복잡한 구조를 띄고 있어 시작품 제작에 있어서의 긴 소요 시간 및 제작 한계, 특성 구현 제한을 초래한다. 최근 3D 프린팅 기술을 이용하여 이와 같은 문제를 해결하거나 기존 구조의 개선을 위한 연구들이 진행되었다<sup>[6]~[8]</sup>. 몇 가지를 언급하자면, 3D 프린팅 기술을 활용하여 구리 도선을 감을 수 있는 틀을 제작하고, 이를 바탕으로 folded helix 안테나의 제작을 용이하게 한 것<sup>[6]</sup>, 3D 프린팅을 통해 플라스틱 프레임을 만들고, 구리 도금을 통해 도선 ESA를 제작한 것<sup>[7]</sup>, 기존의 방식으로는 구현이 쉽지 않았을 3차원 공간에서의 금속 스트립 구조를 이용한 ESA의 설계<sup>[8]</sup> 등이 이에 포함된다.

하지만 현재의 3D 프린팅 기술 역시 물리적 해상도에 한계를 갖고 있어 그 사용이 제한된다. 일례로, polyamide 소재를 사용한 SLS(Selective Laser Sintering) 기술의 경우, 0.8 mm 혹은 그 이상의 최소 프린팅 두께를 갖는다. 참고 문헌 [4]의 FSSH(Folded Slot Spherical Helix) 자기 다이폴은 16개의 folded element로 구성되어 있으며, 시뮬레이션 결과만 제시되었다. 이에 본 논문에서는 FSSH 자기 다이폴의 설계 변수에 관한 연구를 통해 현재의 3D 프린팅 기술 방식으로 구현이 보다 용이한 구조를 제안한다. 또한, non-Foster 정합회로를 통해서 높은  $Q$ 값을 갖는 소형 자기 다이폴 안테나의 방사 효율 대역폭을 향상시킬 수 있음을 보인다.

## II. 본 문

### 2-1 FSSH 자기 다이폴 안테나

FSSH 자기 다이폴 안테나는  $TM_{10}$  방사모드로 동작하면서  $1.5Q_b$ 의 한계값에 근접하는 방사 특성을 보이는 folded spherical helix 전기 다이폴 안테나의 보상구조를 띤다<sup>[4]</sup>. FSSH 구조는 그림 1에 보이는 바와 같이, 급전부가 존재하는  $xy$ 평면을 기준으로 대칭인 금속면을 통해 수직인 성분의 전류 분포를 상쇄한다. 그 결과,  $\phi$  방향의 전류 성분만 존재하며, 이를 통해서  $TE_{10}$  방사 모드가 야

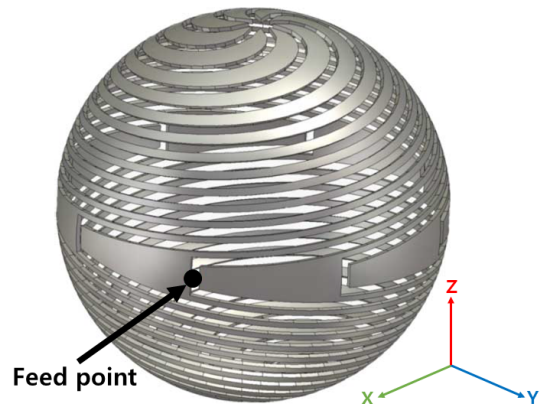


그림 1. FSSH 자기 다이폴 안테나<sup>[4]</sup>

Fig. 1. FSSH magnetic dipole antenna<sup>[4]</sup>.

기되어 자기 다이폴로서 동작한다.

ESA의 경우,  $ka$ 가 0에 가까워질수록 방사저항 및 방사효율이 급격히 감소한다. 이를 극복하기 위해 folded 안테나 구조에서는 일반적으로 folded element의 개수를 증가시킨다. 하지만 folded element의 개수가 늘어날수록 element 사이의 간격은 감소할 수밖에 없는데, 이는 안테나의 구조적 복잡도를 증가시키고, 전기적, 물리적 집침 현상에 따른 소형화의 한계를 야기한다. 그림 1은 참고문헌 [4]에서 제시한 FSSH 자기 다이폴 안테나이며, 제한된 크기에서 방사저항의 증가를 위해 16개의 folded element를 사용하였다. 이 안테나는  $ka=0.276$ 의 전기적 크기를 갖고 306.4 MHz에서 91.5 %의 방사효율 특성을 보인다. 하지만 앞서 언급하였듯이, 일반적인 제작 방식을 통한 실험적 구현은 용이하지 않으며, 3D 프린팅 기술을 사용할 시에도 현재 기술 수준에서 허용하는 물리적 해상도의 한계 때문에 제작에 어려움이 있다.

### 2-2 설계변수 연구를 통한 FSSH의 구조 간소화

그림 2에서  $N$ ,  $g$ ,  $T$ 는 각각 folded element의 개수, element간의 간격, 금속면의 두께를 나타내며,  $g$ 와  $T$ 의 단위는 mm이다. 구리 도전율을 갖는 금속을 사용하였으며, Ansys사의 HFSS를 사용하여 설계를 진행하였다. 표 1은  $N=16$ ,  $g=0.8$ 일 때,  $T$ 에 따른 FSSH 안테나의 특성을 나타낸다. 표 1에서 알 수 있듯이, 입력저항은 FSSH 안테나의 금속면 두께  $T$ 가 두꺼워질수록 줄어든다. 표 2는  $N=16$ ,

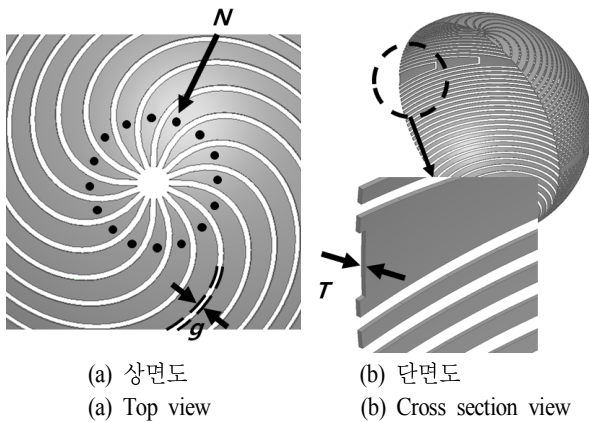


그림 2. FSSH 안테나의 설계변수

Fig. 2. Design parameters of the FSSH antenna.

$T=2$ 일 때,  $g$ 에 따른 FSSH 안테나의 특성을 나타낸다. 표 2에서 보이듯이 folded element 사이의 간격  $g$ 가 커질수록 입력저항과 효율이 증가함을 알 수 있다. 이러한 특성을 이용하여 FSSH 안테나의 구조적 복잡도를 낮춤과 동시에 전기적 소형화에 따른 입력저항과 효율 감소 문제를 해결할 수 있을 것으로 판단된다.

이어 설계변수  $T$ 와  $g$ 에 따른 FSSH 안테나의 특성을 통해 참고문헌 [4]의  $N=16$ 인 안테나를  $N=4$ 로 줄인  $ka=0.27$ 의 FSSH 자기 다이폴 안테나를 그림 3(a)와 같이 설계하였다.  $N=4$ 인 FSSH 안테나( $FSSH_{N=4}$ )는  $N=16$ 인 FSSH 안테나( $FSSH_{N=16}$ )보다 얇은 금속면( $T=0.2$  mm)과 보다 넓은 element 간격( $g=5.3$  mm)으로 이루어져 있다. 비록 이 구조 역시 현존하는 SLS 기술의 프린팅 해상도를 만족하지 못하지만, 줄어든 element의 개수 및 늘어난 element 간격으

표 1. 설계변수  $T$ 에 따른 FSSH 안테나 특성(시뮬레이션)  
Table 1. Characteristics of the FSSH antenna according to the design parameter  $T$ (simulated).

$T$ [mm]	Frequency [MHz]	Radiation efficiency [%]	Input resistance [ $\Omega$ ]
1.0	300.6	89.91	51.68
2.0	301.2	81.56	12.4
3.0	302.3	79.59	5.55
4.0	302.6	78.7	4.54
5.0	304.0	75.3	2.98

표 2. 설계변수  $g$ 에 따른 FSSH 안테나 특성(시뮬레이션)  
Table 2. Characteristics of the FSSH antenna according to the design parameter  $g$ (simulated).

$g$ [mm]	Frequency [MHz]	Radiation efficiency [%]	Input resistance [ $\Omega$ ]
0.5	293.4	66.88	4.32
0.8	301.2	81.56	12.4
1.0	303.0	89.44	21.74
1.5	305.4	93.21	51.74

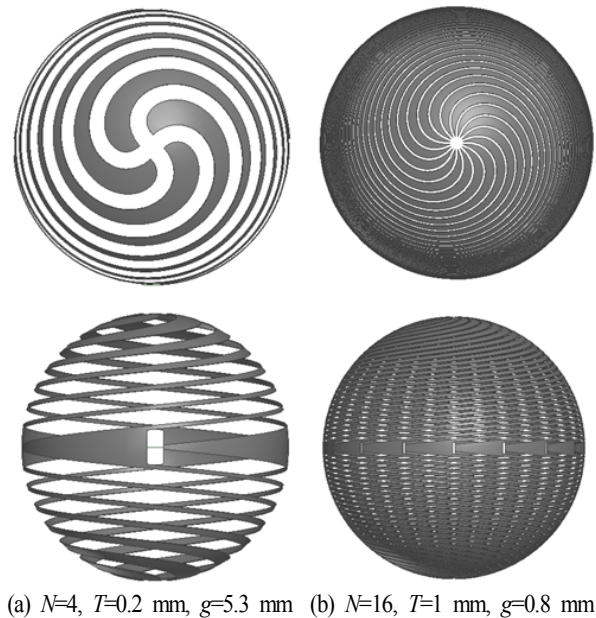
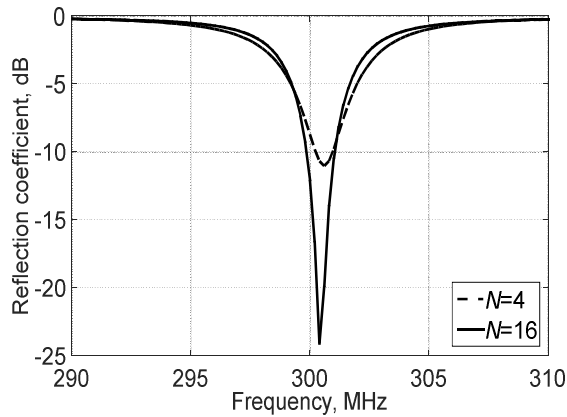


그림 3. FSSH 안테나의 상면도와 측면도

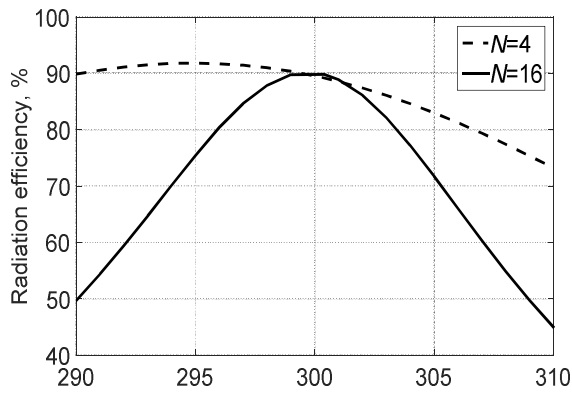
Fig. 3. Top and side view of the FSSH antenna.

로 인해 3D 프린팅을 이용해 틀을 제작하고, 그에 맞게 금속면을 제거하는 방식을 사용할 경우, 비교적 손쉬운 제작이 가능할 것으로 판단된다.

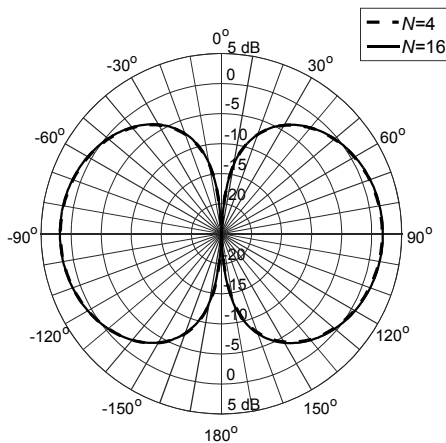
그림 4는  $FSSH_{N=4}$ ,  $FSSH_{N=16}$  자기 다이폴 안테나에 관한 시뮬레이션 비교를 나타낸다. 그림 4(a)와 4(b)에서 보이듯이,  $FSSH_{N=4}$ 와  $FSSH_{N=16}$  안테나는 각각 300.8 MHz, 300.6 MHz에서 공진하며, 그 때의 방사 효율은 88.97 %, 89.91 %로 큰 차이가 없는 것을 확인할 수 있다. 또한, 그림 4(c)의  $H$ -평면 방사패턴에서 보이듯이,  $FSSH_{N=4}$ 와  $FSSH_{N=16}$  안테나는 공진주파수에서 각각 1.80 dB, 1.86 dB의 지향



(a) 반사계수  
(a) Reflection coefficient



(b) 방사효율  
(b) Radiation efficiency



(c) 방사패턴  
(c) Radiation pattern

그림 4. FSSH 안테나의 시뮬레이션 결과  
Fig. 4. Simulated results for FSSH antennas.

성과 수평편파를 갖는 무지향성 방사패턴 특성을 보인다.

### 2-3 Non-Foster 정합회로

그림 4(b)에서 알 수 있듯이,  $FSSH_{N=4}$  안테나의 경우,  $FSSH_{N=16}$  안테나에 비해서 보다 넓은 대역에서 높은 효율 특성을 보인다. 이는  $FSSH_{N=16}$  안테나의 경우, anti-resonance 주파수에서 최대 효율 및 임피던스 정합 특성이 나타나는 반면, 제안된  $FSSH_{N=4}$  안테나의 경우, 그 두 주파수가 일치하지 않기 때문이다. 하지만 이와 같은 넓은 고 효율 주파수 대역은 ESA의 높은  $Q$ 값으로 인한 임피던스 협대역 정합 특성으로 그 실질적 사용이 제한된다. 따라서, 광대역 임피던스 정합을 통해 고 효율 주파수 대역의 효율성을 늘리는 방안을 고려할 수 있다.

집중소자를 이용한 일반적인 정합회로를 이용하여 높은  $Q$ 값을 갖는 소형 자기 다이폴의 대역폭을 증가시키는 데에는 한계가 있다<sup>[9]~[11]</sup>. 참고문헌 [11]에서 제시한 식 (1)을  $FSSH_{N=4}$ 에 적용하여 표 3에 보이는 바와 같은 결과를 얻었다. 식 (1)의  $f_n$ 는 안테나의 공진주파수,  $Q$ 는 공진 주파수에서의 quality factor,  $B_n$ 은  $n$ 개의 집중소자를 이용했을 때의 최대 대역폭,  $\Gamma$ 는 반사계수,  $a_n$ 과  $b_n$ 은  $n$ 개의 집중소자에 따른 계수를 뜻한다. 무한개의 수동 집중소자를 사용한 경우  $-10$  dB 기준의 현 대역 폭 0.2 % (0.6 MHz)에서 최대 1.5 % (4.58 MHz)까지 확장될 수 있다.

표 3.  $n$ 개의 집중소자를 이용한  $FSSH_{N=4}$  안테나의 최대 대역폭

Table. 3. Maximum bandwidth for the  $FSSH_{N=4}$  antenna with  $n$  passive lumped elements.

$n$	$a_n$	$b_n$	Bandwidth [MHz]
1	1	1	1.1793
2	2	1	2.7603
3	2.413	0.678	3.4282
4	2.628	0.474	3.7730
5	2.755	0.347	3.9754
6	2.838	0.264	4.1069
7	2.896	0.209	4.1981
8	2.937	0.160	4.2636
$\infty$	$\pi$	0	4.5794

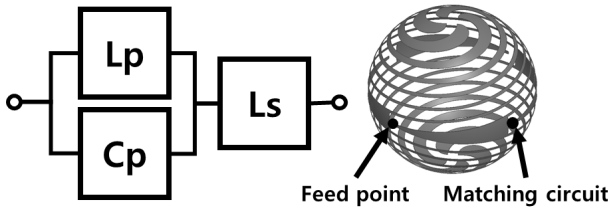


그림 5. Non-Foster 정합회로 구성 및 위치

Fig. 5. Non-Foster matching circuit topology and position.

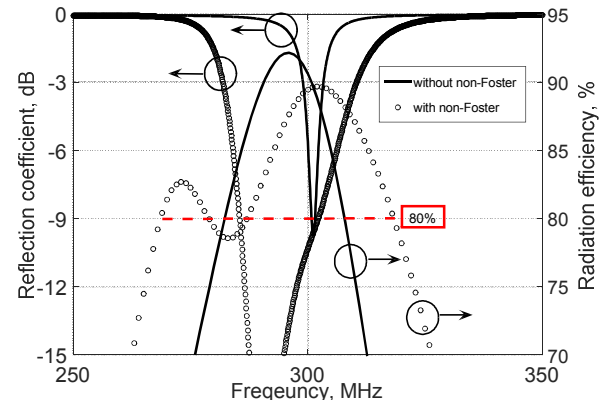
$$\frac{QB_n}{f} = \frac{1}{b_n \sinh \left[ \frac{1}{a_n} \ln \frac{1}{|T|} \right] + (1-b_n) \frac{1}{a_n} \ln \frac{1}{|T|}} \quad (1)$$

이를 해결하기 위해 주파수에 따라 음의 리액턴스 기울기 특성을 보이는 non-Foster 정합회로를 사용할 수 있다<sup>[12]~[14]</sup>. 이를 이용함으로써 이상적으로는 수동 집중소자를 사용함에 따라 나타나는 기존의 Bode-Fano 한계를 넘어서는 대역폭을 획득할 수 있다. 하지만 가장 간단한 구성의 음수값의 직렬 LC 구성만으로는 높은  $Q$ 값을 갖는 제안된 FSSH 안테나의 대역을 증가시킬 수 없다<sup>[12]</sup>. 본 논문에서는 이를 해결하고자 음수값을 갖는 병렬 LC 공진회로 및 음수값의 직렬 L을 이용한 회로를 그림 5와 같이 구성하고, 제안된 FSSH<sub>N=4</sub> 안테나의 급전부와 가장 가까운 folded element에 직렬로 연결하였다. 정합회로의 Lp, Cp, Ls 각각의 값은  $-5.94 \text{ nH}$ ,  $-47.01 \text{ nF}$ ,  $-62.6 \text{ nH}$ 이며, local search algorithm을 통한 curve fitting 방법을 통해 구하였다.

그림 6은 FSSH<sub>N=4</sub> 안테나에 그림 5의 이상적인 non-Foster 정합회로 적용 유무에 따른 방사 특성 시뮬레이션 결과이다. 80 % 이상의 방사효율을 만족하는 주파수 대역폭이 기존의 0.2 % (0.6 MHz)에서 4.6 % (13.6 MHz)로 증가함을 확인할 수 있다. 이때  $-10 \text{ dB}$  기준 임피던스 대역폭은 5.3 % (14.8 MHz) 이다. 또한, 참고문헌 [12]의 연구 결과에 비추어볼 때,  $3.0Q_b$  방사한계치에 근접하지만, 179.5의  $Q$  절대값을 갖는 FSSH<sub>N=4</sub> 안테나의 경우 실제 회로 구현시 최소 3개 이상의 tuning element가 필요할 것으로 예상된다.

## 2.4 안테나 제작

FSSH<sub>N=4</sub> 안테나의 경우, 0.2 mm의 금속면 두께를 갖는

그림 6. Non-Foster 정합회로 유무에 따른 FSSH<sub>N=4</sub> 안테나 시뮬레이션 특성Fig. 6. Simulated results for the proposed FSSH<sub>N=4</sub> antenna with and without non-Foster matching circuit.

다. 이는 제안된 안테나 역시 기존의 FSSH<sub>N=16</sub> 안테나와 마찬가지로 현존 3D 프린팅 기술을 통해서도 참고문헌 [7], [8]과 같이 직접적으로 안테나 프레임을 제작하는데 한계가 있음을 뜻한다. 또한, 참고문헌 [6]과 같이 틀을 이용한 방법 역시 도선 형태가 아닌 금속면을 사용하는 FSSH 안테나의 구조적 특성상 적용이 제한된다. 그림에도 불구하고, 0.2 mm의 금속 두께는 상용 구리 테이프를 통해 구현이 가능하다. 이에 본 논문에서는 FSSH<sub>N=4</sub> 안테나의 금속면이 아닌 비금속 영역을 SLS 방식 3D 프린팅 기술을 이용하여 틀로 제작하고, 이를 통해 제안된 형태의 안테나를 제작하였다.

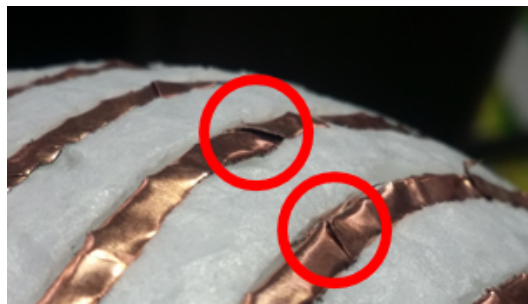
그림 7(a)는 3D 프린팅된 안테나 외곽의 비금속 영역과 동일한 형태의 틀이다. 틀은 견고함 정확성을 위해서 나일론 플라스틱 소재(PA2200)를 사용한 SLS 방식을 이용하였다. 그림 7(b)는 얇은 금속면을 지지하기 위해서 이용된 지름 10 cm의 스티로폼 구이다. 이러한 상용 스티로폼 제품을 사용하면서 동일한  $ka=0.27$ 을 만족하고, 제안된 방식을 통한 제작의 타당성을 검증하기 위해서 목표 대역을 260 MHz로 수정하였다. 이때의  $N$ 은 동일하게 4이며,  $T=0.2 \text{ mm}$ ,  $g=6 \text{ mm}$ 이다.

이후 그림 7(c)와 같이 스티로폼 구에 구리 테이프를 덧씌웠다. 이를 그림 7(d)와 같이 틀과 결합 후 틀을 따라서 비금속 영역을 수작업으로 제거하였다. 이와 같은 방





그림 7. 제안된  $FSSH_{N=4}$  안테나의 제작과정  
Fig. 7. Fabrication of the proposed  $FSSH_{N=4}$  antenna.



(a) 금속 페인트 처리 전  
(a) Before metallic painting



(b) 금속 페인트 처리 후  
(b) After metallic painting

그림 8. 제작된 안테나의 표면  
Fig. 8. Metal surface of the fabricated antenna.

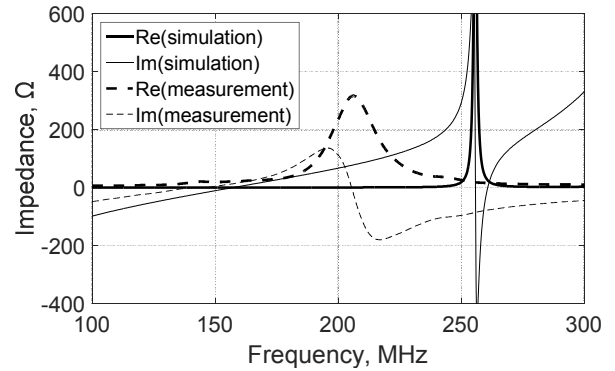


그림 9. 시뮬레이션 및 측정 입력 임피던스  
Fig. 9. Simulated and measured input impedance.

법으로 그림 7(e)와 같은 안테나 시작품을 제작하였다. 하지만 제작된 시작품의 경우, 그림 8(a)와 같이 구리 테이프의 접착력이 낮은 곳에서 서로 전기적으로 연결되지 못하는 현상이 발생했다. 이는 구의 곡면을 보다 잘 표현하고, 0.2 mm의 구리 두께(상용 구리테이프 두께 0.06~0.08 mm)를 맞추기 위해 여러 조각의 구리 테이프를 이용하였기 때문이다. 이를 Electrolube사의 고전도성 실버 페인트 SCP를 사용하여 그림 8(b)와 같이 연결을 하였지만 만족할만한 전도도를 얻는데 한계가 있었다. 그림 9는 제안된  $FSSH_{N=4}$  안테나의 시뮬레이션 및 측정된 입력 임피던스 결과이다. 측정된 입력 임피던스 특성은 시뮬레이션 결과에 비해서 주파수 대비 완만한 변화를 보인다. 이러한 특성은 구리 테이프의 경계면으로 인한 낮은 전도도로 인해 저항손실이 커졌기 때문이다.

### III. 결 론

본 논문에서 기존의 전기적으로 소형이면서 높은 방사 효율을 갖는 FSSH 자기 다이폴 안테나의 특성을 유지하면서 구조적 복잡도를 낮춘 구조를 제안하였다. 이러한 구조적 간소화는 전기적으로 소형인 FSSH 안테나의 시작품 제작에 용이성을 제공한다. 또한, 제안된 FSSH의 넓은 대역에서 높은 방사 효율을 보이는 특성을 non-Foster 정합회로를 이용하여 효율성을 높이는 것이 가능함을 시뮬레이션 결과를 통해 보였다. 이러한 FSSH 안테나의 시작품 제작을 3D 프린팅을 이용하여 틀을 제작 후 시도하였다. 하지만 구 형태에 따른 제작의 어려움이 존재하였

다. 구 형태의 유전 물질 표면에 금속 프린팅을 하는 방식 또한 고려되었지만, 높은 유전 손실에 따른 효율의 저하 때문에 배제되었다. 이에 현재 안테나 방사 특성은 구 형태의 다이폴에 비해 좋지 않지만, 보다 다루기 쉬운 형태 (form-factor)를 띤 원통형의 folded slot cylindrical helix에 관한 연구를 진행 중이다.

## References

- [1] L. J. Chu, "Physical limitations of omni-directional antenna", *J. Appl. Phys.*, vol. 19, pp. 1163-1175, Dec. 1948.
- [2] H. L. Thal, "New radiation Q limits for spherical wire antennas", *IEEE Trans. Antennas Propag.*, vol. 54, no. 10, pp. 2757-2763, Oct. 2006.
- [3] S. R. Best, "The radiation properties of electrically small folded spherical helix antennas", *IEEE Trans. Antennas Propag.*, vol. 52, no. 4, pp. 953-960, Apr. 2004.
- [4] S. R. Best, "A low Q electrically small magnetic(TE mode) dipole", *IEEE Antennas Wireless Propag. Lett.*, vol. 8, pp. 572-575, 2009.
- [5] O. S. Kim, "Low-Q electrically small spherical magnetic dipole antennas", *IEEE Trans. Antennas Propag.*, vol. 58, no. 7, pp. 2210-2217, Jul. 2010.
- [6] H. Huang, K. Nieman, P. -Y. Chen, M. Ferrari, Y. Hu, and D. Akinwande, "Properties and applications of electrically small folded ellipsoidal helix antenna", *IEEE Antennas Wireless Propag. Lett.*, vol. 11, pp. 678-681, 2012.
- [7] O. S. Kim, "Rapid prototyping of electrically small spherical wire antennas", *IEEE Trans. Antennas Propag.*, vol. 62, no. 7, pp. 3839-3842, Jul. 2014.
- [8] M. Kong, G. Shin, S. -H. Lee, and I. -J. Yoon, "Electrically small folded spherical helix antennas using copper strip and 3D printing technology", *IET Electron. Lett.*, vol. 52, no. 12, pp. 994-996, Jun. 2016.
- [9] H. W. Bode, *Network Analysis and Feedback Amplifier Design*, Van Nostrand, pp. 367, 1945.
- [10] R. M. Fano, "Theoretical limitations on the broadband matching of arbitrary impedances", *J. of the Franklin Inst.*, vol. 249, no. 1 pp. 57-83, 1950.
- [11] A. R. Lopez, "Review of narrowband impedance-matching limitations." *IEEE Antennas Propag. Mag.*, vol. 46, no. 46, pp. 88-90, 2004.
- [12] I. -J. Yoon, S. Christensen, V. Zhurbenko, O. K. Kim, and O. Breinbjerg, "Non-foster impedance matching sensitivity of electrically small electric and magnetic spherical dipole antennas", *IET Electron. Lett.*, vol. 52, no. 12, pp. 996-998, 2016.
- [13] 양혜민, 김강욱, "네거티브 임피던스 변환기에 기반을 둔 저항성 V 다이폴 안테나의 논 포스터 매칭", *한국전자과학회논문지*, 26(7), pp. 597-605, 2015년 7월.
- [14] 하상규, 정경영, "광대역 항재밍 소형 헬 안테나용 비 포스터 정합회로", *한국전자과학회논문지*, 27(12), pp. 1112-1115, 2016년 12월.

## 신 건 영



2017년 2월: 충남대학교 전기공학과 (공학사)  
 2017년 3월~현재: 충남대학교 전기공학과 석사과정  
 [주 관심분야] 안테나, 초고주파회로

## 공 명 준



2016년 2월: 충남대학교 전기공학과 (공학사)  
 2016년 3월~현재: 충남대학교 전기공학과 석사과정  
 [주 관심분야] 안테나, EMC

이 수 현



2016년 2월: 전북대학교 항공우주공학과 (공학사)

2016년 8월~현재: 충남대학교 전기공학과 석사과정

[주 관심분야] 안테나, 전자파전파

윤 익 재



2003년 8월: 연세대학교 전기전자공학부 (공학사)

2005년 8월: 연세대학교 전기전자공학과 (공학석사)

2012년 8월: University of Texas at Austin 전기컴퓨터공학과 (공학박사)

2005년 7월~2008년 8월: 삼성종합기술원

연구원

2012년 9월~2014년 8월: Technical University of Denmark 전기공학과 박사후연구원/조교수

2014년 9월~현재: 충남대학교 전기공학과 조교수

[주 관심분야] 안테나, 초고주파회로, 전자파이론