

3D 프린팅과 도금 공정을 이용한 도파관 필터 구현

윤태순*

Realization of Waveguide Filter Using 3D Printing and Electroplating Process

Tae-Soon Yun*

요 약

본 논문에서는 3D 프린팅 공정과 플라스틱 도금 공정을 이용하여 도파관 필터를 구현하였다. 도파관 필터는 캐비티 내부에 수직형 필라를 넣어 소형으로 구현된 공진기와 인덕티브 윈도우로 구성되었고, 입출력은 탭 선로 방식을 이용하여 커넥터의 핀을 필라에 연결하였다. 설계된 필터는 일반적인 캐비티를 이용하는 도파관 필터에 비해 약 91% 감소시킨 24.0 x 58.0 x 38.0 mm³의 부피를 가진다. 설계된 필터는 도금 공정을 위해 인덕티브 윈도우를 갖는 상부와 필라를 갖는 하부로 분할되어 모델링되었고, ABS 수지로 프린팅되었다. 프린팅된 필터는 니켈 전극을 형성하여 10 μ m의 구리를 도금하였다. 측정된 내부 필라 구조를 갖는 도파관 필터는 중심 주파수 2.397GHz에 4.76%의 대역폭을 나타냈으며, 중심 주파수에서의 삽입 손실은 0.15dB, 반사 손실은 20dB 이하의 특성을 나타냈다. 본 논문에서 제안한 내부 필라 구조를 갖는 도파관 필터와 그 제작 공정은 도파관 구조의 소자를 소형, 경량, 저가로 구현할 수 있어 다양한 초고주파 시스템에 응용될 수 있을 것이다.

ABSTRACT

In this paper, the waveguide filter is realized by using the 3D printing and electroplating process. The waveguide filter is consisted of the resonator and the inductive window. The resonator is made small by putting vertical pillar inside the cavity. In case of in/output, the pin of SMA connector is connected to the pillar using the tapped-line method. Designed filter has the volume of 24.0 x 58.0 x 38.0 mm³ that is about 91% reduced compared to general cavity filter. Designed filter is modeled divided into upper part that has the inductive window and lower part that has the pillar. Printed filter by the ABS plastic is plated with 10 μ m thick copper over nickel electrodes. Fabricated filter is measured with the center frequency of 2.397GHz and bandwidth of 4.76%. Also, the insertion loss of filter has 0.15dB and return loss is shown under the 20dB. Suggested waveguide filter with pillar and manufacturing process allows the waveguide devices to be made small, lightweight, and low-cost and can be applied to various RF system.

키워드

Waveguide Filter, Pillar, Inductive Window, 3D Printing, Electroplating Process
도파관 필터, 필라, 인덕티브 윈도우, 3D 프린팅, 도금 공정

* 교신저자: 호남대학교 로봇드론공학과 교수
• 접수일 : 2024. 07. 17
• 수정완료일 : 2024. 08. 29
• 게재확정일 : 2024. 10. 12

• Received : Jul. 17, 2024, Revised : Aug. 29, 2024, Accepted : Oct. 12, 2024
• Corresponding Author : Tae-Soon Yun
Dept. Robotrone Eng., Honam University
Email : tsyun@honam.ac.kr

1. 서론

마이크로스트립(microstrip), 코플래너 웨이브가이드(coplanar waveguide), 동축선로(coaxial cable), 도파관(waveguide) 등의 전송선로는 무선통신에서 각 부품을 연결하면서 회로를 구성하는 가장 기본적인 요소이다. 그 중, 도파관은 크기가 크고 무거우며 다른 소자들과 집적화가 어려운 단점이 있지만, 낮은 손실과 큰 전력 신호를 전송할 수 있다는 장점이 있어 기지국, 중계기 등에 들어가는 필터, 안테나 등의 초고주파 부품 설계에 활용되고 있다[1-5].

가장 대표적 전송선로인 마이크로스트립 선로로 초고주파 공진기를 구현하였을 때 공진기의 Q값은 10에서 500 정도의 크기를 갖지만, 도파관으로 구현되는 초고주파 공진기는 5,000 이상의 Q값으로 높은 주파수 선택도를 가진다. 이를 통해 도파관 공진기를 갖는 도파관 필터는 낮은 손실 특성과 우수한 기울기 특성을 가질 수 있다. 다만, 도파관 공진기는 다른 전송선로 구조의 공진기에 비해 크기가 크며, 도파관이 일체형 금속으로 구현되어 무게가 무겁다는 단점이 있다[4-5].

한편, 3D 프린팅 기술은 1984년 미국의 3D System사에서 3D 프린터를 개발하면서 시작되었고, 소재를 적층하는 방식으로 3차원 물체를 제조하는 기술이다. 이 기술은 디지털 설계도만으로 제품 생산이 가능하여 제조 비용을 절감할 수 있고 제조 공정을 간소화할 수 있다. 현재는 자동차, 전기전자, 항공, 선박, 건축뿐 아니라 다양한 소비제품, 주얼리, 의료 분야에서 다양하게 활용되고 있다[6-9].

본 논문에서는 필터를 구성하는 도파관 공진기의 내부에 직사각형 필라(pillar)를 넣어 작은 크기의 필터를 구현하고자 하였다. 또한, 금속 소재를 이용한 3D 프린팅 기술이 개발되어 있으나 아직 초기 기술 단계이기에 고가의 장비를 활용해야 한다는 단점이 있어, 플라스틱 소재를 이용하여 3D 프린팅으로 설계된 필터를 구현한 후에 도금 공정으로 초고주파 특성을 갖도록 하여 무게의 단점을 해결하고자 하였다.

필터를 구성하는 공진기의 캐비티(cavity) 내부에 직사각형 필라를 넣어 주파수 특성을 확인하였다. 이때, 캐비티의 가로, 세로, 높이는 각각 16.0mm, 16.0mm, 30.0mm로 설정하였고 캐비티 내부 필라는 직사각형 구조를 가지도록 하여 필라의 가로 길이와 높이에 따른 공진 주파수 특성을 그림 1에 나타냈다.

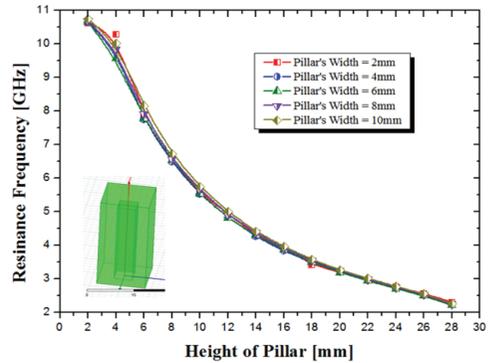


그림 1. 필라 크기에 따른 공진 주파수 특성

Fig. 1 Resonance frequency as the pillar's size

그림 1에서 캐비티 내부 필라의 가로 길이에 따른 공진 주파수는 큰 차이가 없으나 가로 길이가 클수록, 즉 필라의 면적이 증가할수록 공진 주파수가 조금 감소하였다. 한편, 필라의 높이가 증가함에 따라 공진 주파수가 크게 감소하는 것을 확인할 수 있다. 이러한 결과를 통해 필라의 높이가 클수록 더 작은 공진기를 구현할 수 있으며 또한 필터 설계에서 인버터 값에 의한 공진기 변화를 필라의 높이 조절로 구현할 수 있음을 알 수 있다.

본 논문에서 제안되는 도파관 필터는 ISM 대역인 2.4GHz의 중심 주파수에 5%의 대역폭을 갖는 3단 필터로 설계되었다. 리플이 0.03dB인 필터의 설계 파라미터 값은 표 1과 같다.

표 1. 3단 필터의 설계 변수 값

Table 1. Parameter's Values of 3 stage BPF

Parameter	Value	Parameter	Value
$g_1 = g_3$	0.7872	$Q_{e,in} = Q_{e,out}$	15.744
g_2	1.0749	$M_{12} = M_{23}$	0.054

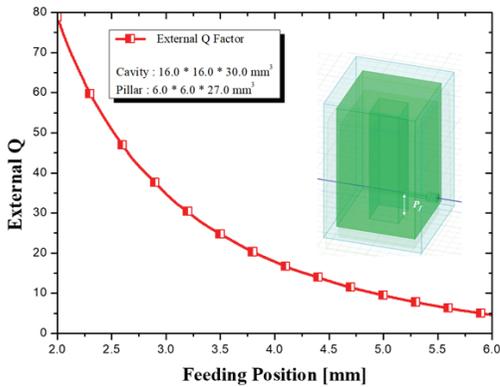
II. 도파관 필터의 설계

도파관 필터의 크기 감소를 위해, 본 논문에서는

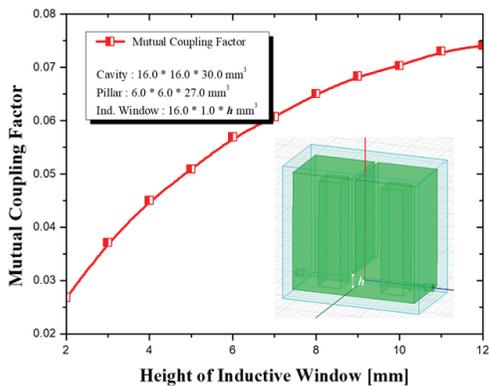
그림 1의 결과에 의해 2.4GHz의 설계 주파수에 맞추기 위해 필라의 높이를 27.0mm로 설정하였다. 설계 파라미터인 Q_E 는 탭 선로 방식을 이용하여 입력부의 커넥터 위치에 따른 공진 주파수의 위상값을 통해 그림 2(a)와 같이 도출되었고, $M_{i,i+1}$ 값은 인덕티브 윈도우 (inductive window)의 크기에 따른 두 공진 주파수를 통해 그림 2(b)와 같이 도출되었다. 이때, Q_E 와 $M_{i,i+1}$ 을 도출한 식은 식 (1), (2)와 같다[10].

$$Q_E = \frac{f_0}{|f_{-90} - f_{+90}|} \quad \dots (1)$$

$$M_{i,i+1} = \frac{2|f_1 - f_2|}{f_1 + f_2} \quad \dots (2)$$



(a)



(b)

그림 2. EM 설계에 의한 Q_E 값과 $M_{i,i+1}$ 값
Fig. 2 Values of Q_E and $M_{i,i+1}$ by EM simulation

식 (1)에서 f_{-90} 과 f_{+90} 은 공진 주파수의 위상과 $\pm 90^\circ$ 의 위상을 갖는 주파수를 가리키고, 식 (2)에서 f_1 과 f_2 는 인버터와 두 개의 공진기에 의해 만들어진 두 공진 주파수를 가리킨다.

그림 2(a)에서는 동축선로 구조의 입력력부가 공진기 내부의 필라에 연결되는 위치에 따른 Q_E 값을 나타낸 것으로 위치가 필라 바닥으로부터 위쪽으로 이동됨에 따라 Q_E 값은 감소하였다. 그림 2(b)는 동일한 두 공진기 사이의 벽에 인덕티브 윈도우를 형성하여 공진기 사이의 인버터를 구현하는데, 그 윈도우의 크기에 따른 상호 결합계수를 나타낸 것으로 윈도우의 크기가 클수록 결합계수는 증가하였다. 설계되는 상호 결합계수의 오차를 줄이기 위해 공진기와 입력력부의 연결은 작은 결합계수로 실험하였다.

표 1의 파라미터 값을 만족하기 위해 커넥터의 위치(P)는 4.2mm, 공진기 사이의 인덕티브 윈도우의 높이(h)는 5.2mm로 최적화 설계되었다. 설계된 필터의 각 치수는 표 2와 같다.

표 2. 설계된 도파관 필터의 치수

Table 2. Dimension of designed waveguide filter

Contents	Dimension
Resonator	16.0 x 16.0 x 30.0 mm ³
1 st & 3 rd Pillar	6.0 x 6.0 x 27.0 mm ³
2 nd Pillar	6.0 x 6.0 x 26.3 mm ³
Position of in/out	4.2 mm
Inductive window	16.0 x 1.0 x 5.2 mm ³

표 2는 3단 대역통과 필터의 치수를 나타내고 있는데, 첫 번째와 마지막 공진기에 들어가는 필라와 가운데 공진기에 들어가는 필라의 높이가 다른 것은 인덕티브 윈도우로 구현되는 공진기 양쪽의 인버터에 의해 공진 값이 바뀌기 때문이다. 이러한 값을 통해 구현된 3단의 내부 필라 구조를 갖는 도파관 필터는 3mm 두께의 외벽을 포함하여 24.0 x 58.0 x 38.0 mm³의 크기를 가져 일반적인 캐비티 구조의 도파관 필터의 86.4 x 158.5 x 43.2 mm³에 비해 91% 감소된 크기를 갖는다.

설계된 내부 필라 구조를 갖는 도파관 필터는 그림 3과 같이 중심 주파수 2.405GHz에 4.84%의 대역폭을

나타냈으며, 중심 주파수에서의 삽입 손실은 0.002dB, 반사 손실은 20dB 이하의 특성을 나타냈다.

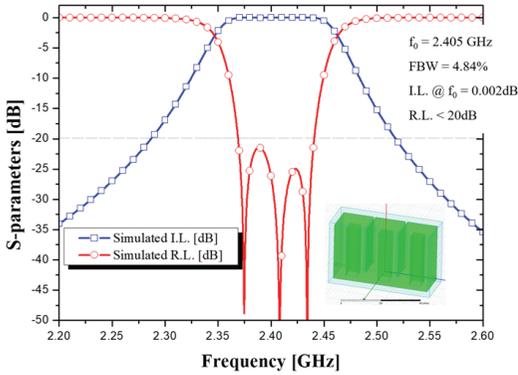


그림 3. 3단 도파관 대역통과 필터의 설계 결과
Fig. 3 Simulated results of the 3 stage waveguide bandpass filter

III. 3D 프린팅을 이용한 도파관 필터의 구현 및 측정

본 논문에서는 내부 필라 구조를 갖는 도파관 필터를 3D 프린팅과 도금 공정을 이용하여 제작하기 위해 Fusion 360 프로그램을 이용하여 그림 4와 같이 모델링 하였다.

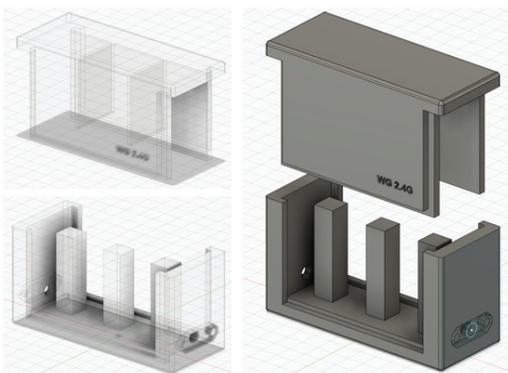


그림 4. 설계된 도파관 필터의 3D 모델링
Fig. 4 3D modelling of the designed waveguide filter

설계된 필터는 밀폐된 구조이기에 필터 내부의 도금 공정을 위해 모델링은 그림 4와 같이 상부·하부 2개로 나눠 그려졌고 필터의 외벽은 3mm로 설정되었다. 또한, 상·하부가 결합되는 부분은 긴 홈을 넣어서 필터의 두 구조물이 전기적으로 잘 결합될 수 있도록 하였으며, 상·하부의 공차는 0.15mm로 최적화하였다.

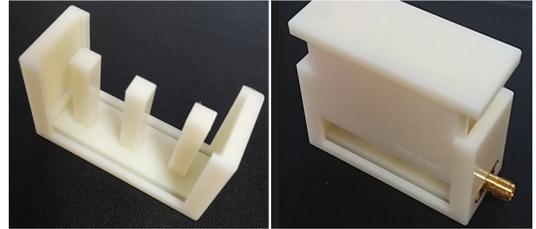


그림 5. 도파관 필터의 3D 프린팅
Fig. 5 3D printing of the waveguide filter

그림 5는 3D 프린팅된 결과물의 사진이다. 좌측에는 필라가 구현된 필터 하부를 보여주었고, 우측에는 필터의 상·하부가 결합되는 것을 나타내었다. 또한, SMA 커넥터의 핀이 연결되는 필라 내부에 1.5mm 깊이의 원형 홈을 형성하고 커넥터 핀을 10mm로 하여 필터의 입출력부가 공진기 내부의 필라에 연결될 수 있도록 하였다.

설계된 도파관 필터는 도금 공정을 이용하여 제작하기 위해 일반적으로 3D 프린터에서 사용되는 ABS 수지로 프린팅되었고, 탈지 공정, 에칭 공정, 중화 공정, 촉매화 공정, 활성화 공정, 니켈도금 공정, 구리도금 공정 등 총 7단계의 공정을 통해 휴로시스사에서 진행되었다.

탈지 공정은 ABS 수지 표면의 이물질을 제거하기 위한 것으로 50°C의 탈지액을 통해 10분간 진행하였다. 에칭 공정은 플라스틱 표면에 촉매가 잘 부착되도록 수지의 표면층에 있는 고무 성분을 용해하는 공정으로, 무수크롬산과 황산에 의해 조성된 60°C의 에칭액을 통해 10분간 진행하였다. 중화 공정은 강산에 의해 표면이 에칭된 ABS 수지를 중화시키는 단계로 19% 염산수용액을 통해 2분간 진행하였다. 촉매화 공정은 플라스틱 표면에 감수성을 부여하고 활성화하기 위한 것으로 35°C의 주석/팔라듐 콜로이드 용액에 3

분간 담귀 진행하였다. 활성화 공정은 플라스틱 표면에 남아있는 과잉의 주석산화물을 제거하기 위한 것으로 12% 황산수용액을 통해 50°C에서 3분간 진행하였다. 니켈도금 공정은 구리도금 전단계로 플라스틱에 니켈을 도금하여 전도성을 부여하는 것이다. 도금액은 3g의 황산니켈, 1.5g의 구연산나트륨, 2.5g의 염화암모늄, 2.5g의 차아인산나트륨을 100ml의 정제수에 용해하여 형성하였으며, 30°C의 도금액에 5분간 도금을 진행하여 2μm의 니켈 도금층을 형성하였다.

마지막으로 구리도금 공정은 20g의 황산구리와 5g의 황산을 정제수 100ml에 용해하여 구리 도금액을 만들어 3.5V, 1A의 조건으로 도금을 진행하였다. 구리의 경우 2.4GHz의 표피두께(skin depth)는 약 1.35μm이므로 초고주파 전달 특성을 만족시키기 위해 20분간 도금을 진행하여 10μm의 구리층을 형성하였다. 각 공정에서의 실험 조건은 표 3에 나타내었다.

표 3. 플라스틱 도금 세부 공정의 실험 조건

Table 3. Condition of each process for metal plating

Process	Condition
Degreasing	So Clean Cleaner : 50°C, 10min
Etching	etchant(CrO ₃ +H ₂ SO ₄) : 65°C, 10min
Neutralization	HCl+H ₂ O : 25°C, 2min
Catalyst	Pd/Sn Colloid : 35°C, 3min
Activation	HCl+H ₂ O : 50°C, 3min
Nickel Plating	plating solution : 30°C, 5min
Copper Plating	3.5V, 1A, 30°C, 20min



그림 6. 구리 도금된 도파관 필터의 사진

Fig. 6 Photograph of waveguide filter plated by copper

그림 6은 10μm의 구리 도금층을 갖는 도파관 필터의 사진이다. 도파관 필터의 입출력은 ㄱ에이스 앞에 프 컴에 주문 제작한 10mm의 핀 길이를 갖는 SMA 커넥터를 사용하였고, 커넥터 핀이 연결되는 필라의 원형 홈과 필터의 상·하부의 홈에 도전성 접착제를 소량 도포하여 결속력을 강화하였다.

최종적으로 3D 프린팅과 도금 공정을 이용하여 제작된 3단의 내부 필라 구조를 갖는 도파관 필터는 24.0 x 58.0 x 38.0 mm³의 크기를 가졌고, 벡터 회로망 분석기를 통해 측정된 필터의 측정 결과는 그림 7에 나타내었다. 측정된 내부 필라 구조를 갖는 도파관 필터는 그림 3의 설계 결과에 비해 중심 주파수가 8MHz 하향된 2.397GHz, 대역폭이 0.08% 감소된 4.76%를 나타냈으나, 중심 주파수에서의 삽입 손실은 0.15dB, 반사 손실은 20dB 이하의 특성을 나타내 설계와 유사한 값을 보여줬다.

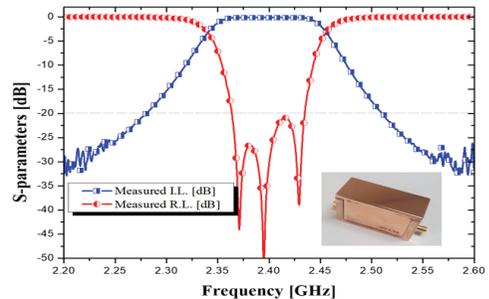


그림 7. 3단 도파관 대역통과 필터의 측정 결과
Fig. 7 Measured results of the 3 stage waveguide bandpass filter

IV. 결론

본 논문에서는 수직형 캐비티 내부에 필라를 넣어 소형화시킨 공진기를 이용하여 3단의 도파관 대역통과 필터가 설계되었다. 필터의 입출력부에 위치하는 인버터는 첫 번째 공진기의 내부 필라에 커넥터의 핀을 연결하여 핀 위치에 의해 구현되었고, 가운데 인버터는 공진기 사이에 인덕티브 윈도우를 형성하여 구현하였다. 이러한 내부 필라를 갖는 3단의 도파관 필터는 일반적인 캐비티 구조를 갖는 도파관 필터에 비해 91% 작은 크기를 갖는다. 또한, 3D 프린팅 기술과

플라스틱 도금 공정을 이용하여 설계된 필터를 저가, 경량으로 제작하였다. 도금 공정을 수행하기 위해 필터를 상·하부로 분리하여 프린팅하였고, 상·하부 결합부에는 홈을 형성하여 도금 공정 이후 전기적인 손실을 최소화하면서 결합하였다. ABS 수지로 프린팅된 필터는 필터의 모든 면적에 니켈 전극을 형성하여 10 μ m의 두께의 구리를 도금하였다.

제작된 내부 필라 구조를 갖는 도파관 필터는 삽입 손실이 다소 증가하긴 하였으나 설계 결과와 유사한 특성을 보였다. 본 논문에서 제안한 내부 필라 구조를 갖는 도파관 필터와 그 제작 공정은 도파관 구조의 소자를 소형, 경량, 저가로 구현할 수 있어 다양한 초고주파 시스템에 응용될 수 있을 것이다.

감사의 글

본 논문은 2024년도 교육부의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 지자체-대학 협력기반 지역혁신 사업의 결과입니다. (2021RIS-002)

References

[1] N. Marcuvits, *Waveguide Handbook*. London: Peter Peregrinus Ltd., 1986.

[2] J. Hong, B. Kim, L. Yun, and S. Lee, "Evanescent-mode Waveguide Band-pass Filter Applied by Novel Metal Post Capacitor," *J. of Korea Institute Electronic Communication Science*, vol. 17, no. 5, 2022, pp. 775-782. <http://doi.org/10.13067/JKIECS.2022.17.5.775>

[3] G. Kim, "Design of Slotted Waveguide Antenna with Slot Depth Variation," *J. of Korea Institute Electronic Communication Science*, vol. 8, no. 4, 2013, pp. 535-540. <http://doi.org/10.13067/JKIECS.2013.8.4.535>

[4] T. Yun, "Realization of Folded Ridge Waveguide Using Y-type Structure and Transition of Folded Ridge Waveguide," *J. of Korea Institute Electronic Communication Science*, vol. 19, no. 1, pp. 19-24, 2024. <http://doi.org/10.13067/JKIECS.2024.19.1.19>

[5] J. Rao, K. Nai, P. Vaitukaitis, Y. Li, and J. Hong, "3-D Metal Printed Compact High-Q Folded Waveguide Filter with Folded

Antenna," *IEEE Trans. on Microwave Theory and Techniques*, vol. 70, no. 1, 2022, pp. 112-121. <http://doi.org/10.1109/TMTT.2021.3125352>

[6] H. Kim, J. Kim, and S. Baek, "Design and Implementation of Motor-Based Rehabilitation Wearable Robot Hand System Using 3D Printing," *J. of Korea Institute Electronic Communication Science*, vol. 16, no. 5, pp. 941-946, 2021. <http://doi.org/10.13067/JKIECS.2021.16.5.941>

[7] P. Deffenbaugh, T. Weller, and K. Church, "Fabrication and Microwave Characterization of 3-D Printed Transmission Lines," *IEEE Microwave and Wireless Comp. Lett.*, vol. 25, no. 12, 2015, pp. 823-825. <http://doi.org/10.1109/LMWC.2015.2495184>

[8] X. shang, P. Penchev, C. Guo, M. Lancaster, S. Dimov, Y. Dong, M. Favre, M. Billod, and E. Rijk, "W-Band Waveguide Filters Fabricated by Laser Micromachining and 3-D Printing," *IEEE Trans. on Microwave Theory and Techniques*, vol. 64, no. 8, 2016, pp. 2752-2580. <http://doi.org/10.1109/TMTT.2016.2574839>

[9] Y. Kim, M. Tentzeris, and S. Lim, "Low-Loss and Light Substrate Integrated Waveguide Using 3D Printed Honeycomb Structure," *Materials*, vol. 12, no. 3, 2019, p. 402. <https://doi.org/10.3390/ma12030402>

[10] J. Hong and M. Lancaster, *Microwave Filters for RF/Microwave Applications*. New York: Wiley, 2001.

저자 소개

윤태순(Tae-Soon Yun)



2000년 국민대학교 전자공학과 (공학사)
 2002년 광운대학교 전파공학과 (공학석사)
 2006년 광운대학교 전파공학과 (공학박사)

2007년 10월~2008년 09월: The SUNY at Buffalo Post Doc.

2008년 10월~2010년 02월: 광운대학교 연구교수
 2010년 03월~현재: 호남대학교 로봇드론공학과 교수

※ 관심분야 : 마이크로파 소자, CRLH 전송 선로