

고출력 마이크로파 수냉식 RF Load 설계

High-Power Water-Cooled RF Load

허예림 · 이철언 · 박수연 · 최진주

Ye-Rim Heo · Cheol-Eon Lee · Su-Yeon Park · Ju-Yeong Kang · Jin Joo Choi

요 약

본 논문은 고출력 RF load 중 간단한 구조를 갖는 UHF 대역의 수냉식 RF load를 설계하였다. RF 정합에 영향을 주는 물성을 얻기 위한 수식을 정립 후, load에 채어줄 수돗물의 유전율과 $\tan \delta$ (Loss tangent)을 측정하였다. 또한, 높은 출력의 전자파가 인가될 경우, 수돗물의 온도가 올라가기 때문에 온도의 변화에 따른 유전율과 $\tan \delta$ 의 변화도 측정하였다. Water-load의 길이를 줄이기 위해 molybdate를 수돗물과 혼합시켜 주어 농도에 따른 물성 변화도 측정하였다. 측정 결과, 일반 냉각수에 비해서 혼합물의 경우 $\tan \delta$ 값이 약 26배 증가함을 확인하였다. 이를 바탕으로 수냉식 RF load를 제작하였고, 주파수 460 MHz에서 반사계수 -19 dB, 대역폭 15 %의 우수한 결과를 얻었다.

Abstract

This paper presents the design of a water-cooled radio-frequency(RF) load with simple structure, for use in the ultrahigh-frequency (UHF) band. After establishing a formula to obtain the physical properties that affect RF matching, we measure the permittivity and $\tan \delta$ (Loss tangent) of tap water. Because the temperature of tap water increases upon applying high power, we measure the permittivity and $\tan \delta$ for all changes in the temperature of tap water. In order to reduce the length of the water-load, molybdate with high $\tan \delta$ is mixed with tap water. The loss tangent of the mixture is found to be approximately 26 times higher than that of tap water. Finally, we manufacture a water-cooled RF load and measure its characteristics. A reflection coefficient of -19 dB and bandwidth of 15 % is obtained at 460 MHz.

Key words: Permittivity, Loss Tangent, Water-Cooled RF Load

I. 서 론

고출력 마이크로파 실험을 위해서는 고출력 파워를 흡수시킬 수 있는 RF load가 필요하다. 많은 타입의 RF load 중 비교적 간단한 구조를 갖는 수냉식 RF load에 관한 연구도 진행되고 있다. 수냉식 RF load도 구형 도파관과 원형 도파관, 동축선 등과 같이 여러 구조로 설계될 수 있다

[1]~[3]. 흡수제로 사용 될 물질도 여러 가지를 선택할 수 있다. 예를 들어, 수돗물, 탈이온수, glycol 등이 있다. 수돗물의 경우에는 사용하기에 용이하다는 장점이 있으나, 알루미늄과 같은 소재를 부식시킬 수 있다는 단점이 있다. 이를 보완하기 위해 탈이온수를 사용할 수도 있다[1]. Glycol의 경우에는 VHF-UHF 대역에서 높은 RF 흡수율을 갖는다는 장점이 있으나, 오늘날, 환경적으로 문제점이

「이 연구는 U.S Office of Naval Research의 지원과 2018학년도 광운대학교 교내 연구비 지원으로 연구되었음.」

광운대학교 전자융합공학과(Department of Electronic Convergence Engineering, Kwangwoon University)

· Manuscript received May 24, 2019 ; Revised June 19, 2019 ; Accepted June 20, 2019. (ID No. 20190524-051)

· Corresponding Author: Jin Joo Choi (e-mail: jinchoi@kw.ac.kr)

있는 단점이 있다^[2].

본 연구실에서는 RF 공진기를 이용하여 80 kW 파워 결합 시스템을 연구하고 있다^[1]. 이 때, 80 kW의 고출력 전자파를 흡수하기 위해서 우리는 6-1/8" 동축선 구조의 수냉식 RF load를 선택하여 정합회로를 설계하였다. 설계 과정에서 수냉식 RF load는 물의 특성이 전자파 정합조건에 관련 있어 물성을 분석해야 하는 필요성을 갖게 된다. 또한, 고출력 전자파에 의해서 물의 온도가 상승한다는 점을 염두에 두어 온도에 따른 물성의 변화를 측정하였다. 더 나아가 수냉식 RF load의 길이를 줄이기 위해 $\tan \delta$ 를 높여주도록 molybdate(MoO_4^{2-})를 혼합해 주었고, 농도에 따른 혼합물 특성 변화도 측정하였다. 측정된 물질 값을 사용하여 HFSS로 동축선의 정합회로를 설계하여 제작하였다.

2장에서는 물성 측정에 필요한 이론을 서술하였고, 3장에서는 온도와 혼합물의 농도에 따른 물성 특성을 측정하였다. 4장에서는 수냉식 RF load 설계 및 제작된 load의 실험결과에 대해 논할 것이다.

II. 물성 측정 방법

수냉식 RF load의 정합회로 설계에 앞서, 임피던스 값에 영향을 주는 물성인 유전율과 $\tan \delta$ 를 측정하기 위해 그림 1(a)와 같이 VNA(Vector Network Analyzer)와 Dielectric Probe를 사용하였다. VNA는 one-port calibration 방법으로 교정하였고, Dielectric probe는 0.141 inches semi-rigid coaxial cable을 사용하였다. Probe의 한쪽 끝은 평평하게 절단하여 측정하고자 하는 물속에 잠기게 하였다. Probe 끝을 calibration plane으로 만들기 위해서 port extension을 하여 reference plane으로 교정하였다. 이 때, 그림 1(a)의 배치도는 그림 1(b)와 같이 등가회로로 표현할 수 있다. 이 때, Y_0 는 Coaxial cable 특성 Admittance이고, Y_L 은 부하의 Total Admittance이다. 이에 의해 Y_L 은 다음과 같이 표현할 수 있다. 식 (1)에서 C_i 는 Coaxial cable의 끝단에서 발생하는 fringing field로 인한 fringing capacitance, C_0, A, B 는 Coaxial cable 끝에 달린 probe tip의 구조와 관련된 상수, ω 는 측정할 때 사용한 주파수이고 ϵ_r 은 구하고자 하는 물질의 유전율이다^[4].

$$Y_L(\omega, \epsilon) = j\omega C_i + j\omega C_0\epsilon_r + jB\omega^3\epsilon_r^2 + A\omega^4\epsilon_r^{2.5} \quad (1)$$

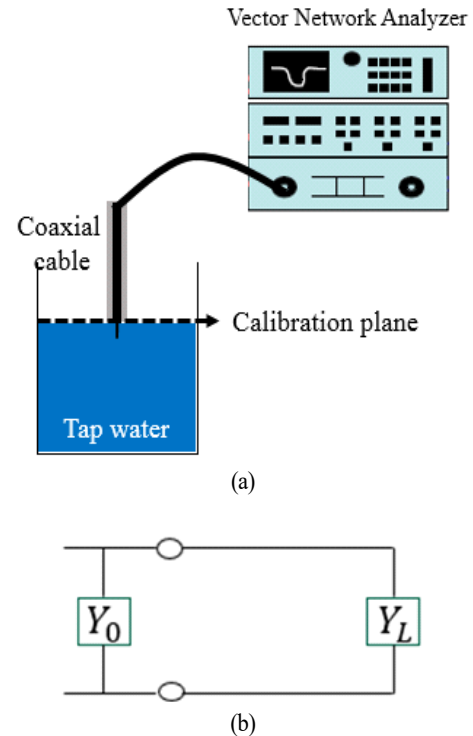


그림 1. (a) 측정 배치도, (b) 등가 회로

Fig. 1. (a) The layout of probe measurement, (b) equivalent circuit.

위의 식을 이용하여 유전율을 얻기 위해서는 4가지의 미지수 값 (C_i, C_0, B, A)를 알아야 한다. 따라서 기존에 유전율 값을 알고 있는 기준이 되는 4개의 물질이 필요하게 되고, 본 논문에서는 이 4가지의 기준 물질로서 공기, 증류수, 메탄올, 아세톤을 선택하였다. 일반적으로 유전상수 값은 주파수에 따라 다른 값을 지닌다. 본 논문에서는 정확히 460 MHz에서의 유전상수 값을 찾을 수 없기 때문에, 표 1과 같이 1 GHz에서 기준물질의 유전상수 값을 사용하였다. 각각의 기준 물질에 해당하는 4개의 복소수 방정식을 Gauss Seidel 기법을 사용하여 MATLAB에서 미지수를 구하여 주었고, 결과는 표 2와 같다.

표 1. 4개의 기준 물질 및 물질의 유전율
Table 1. 4 reference materials and permittivity.

Substances	Air	Distilled water	Methanol	Acetone
ϵ_r	1.0006	$78-j4.2$	$32.7-j7$	$20.7-j0.8280$

표 2. Gauss Seidel 기법을 이용하여 구한 미지수 값
Table 2. Coefficients obtained from Gauss Seidel technique.

A	$-1.78 \times 10^{-46} + j4.25 \times 10^{-47}$
B	$-3.49 \times 10^{-36} - j1.17 \times 10^{-35}$
C_0	$2.10 \times 10^{-14} + j5.93 \times 10^{-15}$
C_i	$5.42 \times 10^{-14} - j3.28 \times 10^{-14}$

III. 유전을 측정 실험

본 논문에서는 수냉식 RF load에 채울 물질로서 수돗물을 선택하였다. 따라서 수돗물의 물성을 측정하였다. 실험은 1 GHz에서 진행하였고, 2 L의 수돗물을 HP 8510 VNA를 사용하여 온도가 10℃에서 80℃까지 변할 때의 반사계수 값을 측정하였다. 이를 통해 유전율과 $\tan \delta$ 의 값을 2절에서 구한 식을 이용하여 구하였다. 측정 결과, 온도가 1℃ 증가할 때 유전율은 약 0.5씩 선형적으로 감소하는 추세를 보이며, $\tan \delta$ 는 감소하다가 약 40℃ 이상에서 증가하고, 약 60℃에서는 다시 감소하는 것을 확인할 수 있다(그림 2). $\tan \delta$ 값이 다시 올라가는 이유는 온도가 증가함에 따라 물의 conductivity가 증가하게 되어 dielectric loss에서 conductivity loss로 바뀌어 발생하기 때

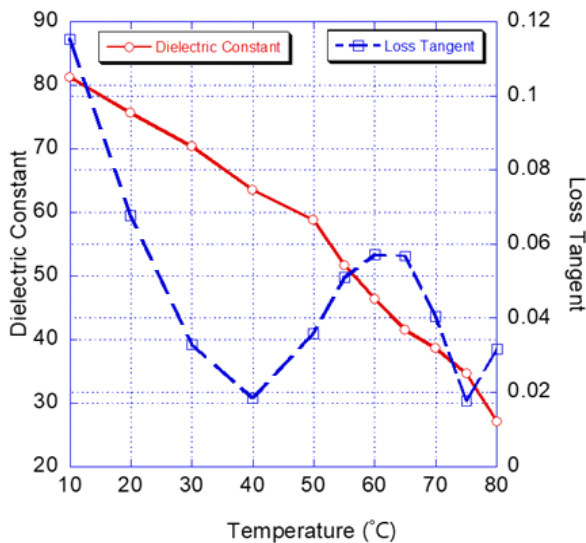


그림 2. 수돗물의 온도에 따른 유전율과 $\tan \delta$
Fig. 2. Permittivity and loss tangent of changed tap water temperature.

문이다. 이러한 현상은 기존의 다른 연구 논문에서도 관찰된 현상이다^[3].

앞에서 언급했듯이, 수냉식 RF load를 설계할 때, 파워 감쇠가 클수록 load의 길이를 줄일 수 있다. 따라서 본 논문에서는 높은 $\tan \delta$ 와 더불어 환경오염이 없고 부식도 방지해주는 molybdate를 선택하여 증류수와 섞어 혼합물을 만들어 물성을 측정하였다. 실험은 앞과 동일하게 1 GHz에서 실행하였으며, 온도는 실온인 27.3℃에서 진행하였다. 이 때, 혼합물의 농도는 증류수는 1 L로 고정시키고, molybdate를 10 g에서 60 g까지 점차 섞어주며 변화시켜 주었다. 실험 결과는 그림 3과 같다. Molybdate의 농도가 증가함에 따라 유전율은 약 70을 유지하였으며, $\tan \delta$ 는 점차 증가하는 것을 확인할 수 있다. 또한, 그림 1의 $\tan \delta$ 와 비교해 보았을 때, 27.3℃에서 약 0.025가 0.65까지 크게 증가할 수 있음을 알 수 있다. 따라서 수냉식 RF load의 길이를 줄일 수 있음을 확인하였다.

증류수 1 L에 molybdate 10 g을 섞은 혼합물의 온도를 10℃에서 80℃까지 변화시키며 유전율과 $\tan \delta$ 를 측정하였다. 수돗물(그림 2)과 마찬가지로 온도가 증가함에 따라 혼합물의 유전율은 감소하는 추세를 보이며, $\tan \delta$ 는 증가하다가 일정 온도에서 감소하다 증가하는 것을 확인할 수 있다.

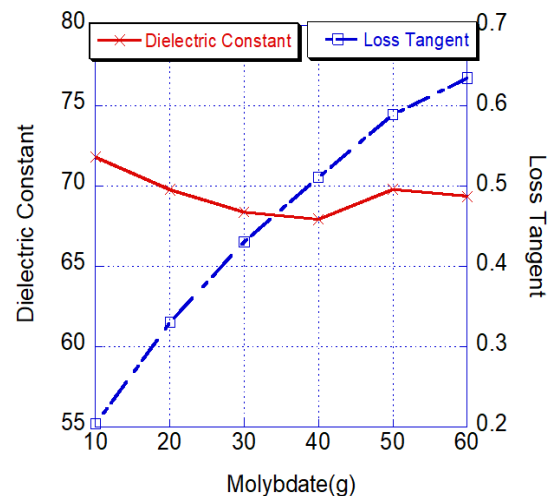


그림 3. Molybdate 농도에 따른 혼합물의 유전율과
Fig. 3. Permittivity and loss tangent of changed molybdate's concentration.

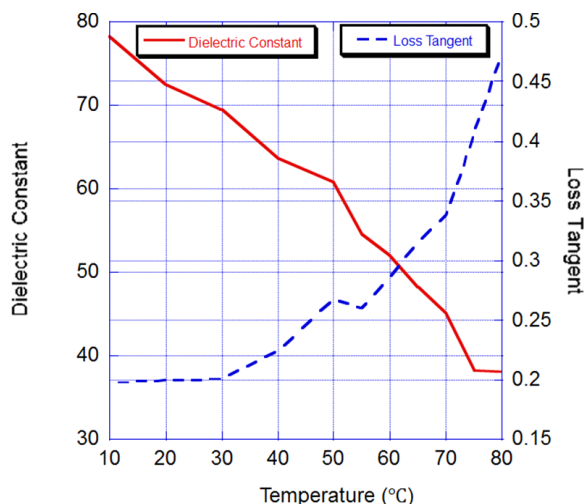


그림 4. 혼합물의 온도에 따른 유전율과 $\tan\delta$
Fig. 4. Permittivity and $\tan\delta$ of changed molybdate mixture temperature.

IV. Water-Cooled RF Load 설계 및 측정

앞의 물성 측정 결과를 바탕으로 수냉식 RF load를 6-1/8" 동축선으로 선택하여 설계하였다. 먼저, 유전율이 약 80이라고 가정하고(물의 온도는 약 10°C 라고 가정), 그림 5의 좌측 그림과 같이 $\lambda/2$ (약 36 mm) 길이에 물을

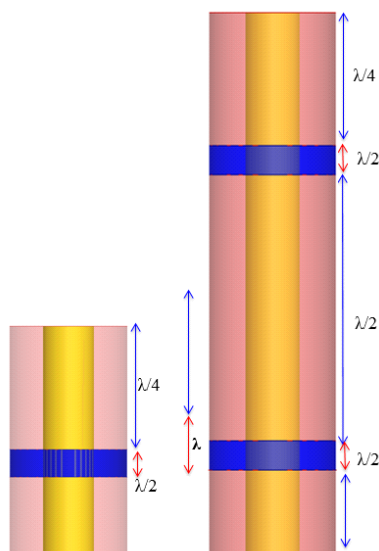


그림 5. Water-load의 초기 디자인 모델
Fig. 5. Early design of water-load.

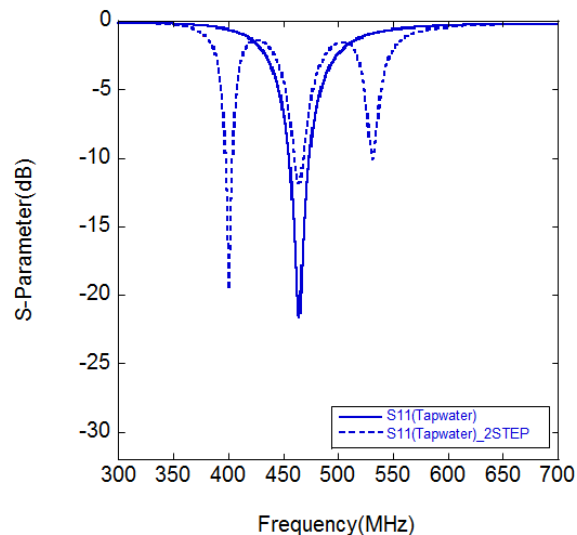


그림 6. 초창기 모델의 시뮬레이션 결과
Fig. 6. Simulation results of early design.

채운 후, HFSS로 시뮬레이션하였다. 이때, 중심 주파수는 460 MHz로 설정하였다. 추가로 대역폭을 넓히기 위해 그림 5의 우측 그림과 같이 물은 폭이 $\lambda/2$ 인 2개의 단에 넣어주고 시뮬레이션 하였다. 시뮬레이션 결과 1 step일 경우 460 MHz에서 공진이 일어나고(그림 6의 실선), 2 step일 경우 460 MHz 주위로 약 60 MHz의 간격을 두고 공진 주파수가 추가로 생기는 것을 확인할 수 있다(그림 6의 점선).

그림 7은 수냉식 RF load의 최종 디자인 모델이다. 광대역을 위해 $\lambda/2$ 길이의 2 step으로 설계하지 않고, 1,000 m의 길이의 1 step line으로 물을 채워주었다. 물과 50 전송 선로의 임피던스 매칭을 위해 stepped transformer도 추가하였다. 추가로 물과 전송 선로와의 차폐를 위해 trans-



그림 7. Water-cooled RF load의 CAD 도면
Fig. 7. CAD layout of water-cooled RF load.

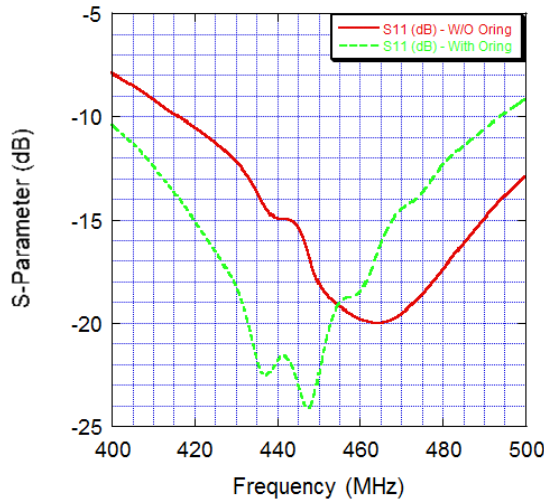


그림 8. 오링의 유무에 따른 water-load의 S_{11}
Fig. 8. S_{11} of water-load with/without O-ring.

former와 water load 사이에 teflon을 넣어 주었으며, 플렌지 결합 부분의 물이 세지 않도록 고무재질의 O-ring을 넣어 보완하였다.

실제 설계과정에서 추가로 보완해준 O-ring의 유무에 따라 load의 특성이 변화할 수도 있어 HFSS로 O-ring을 넣어 모델링한 후 시뮬레이션을 했다. 그 결과, 그림 8과 같이 O-ring이 있는 경우(점선)가 없는 경우(실선)보다 S_{11} 값이 더 좋게 나왔지만, 주파수가 down shifting되는 현상을 확인하였다. 하지만 원하는 주파수 460 MHz에서 S_{11} 이 약 -20 dB로 적절하다고 판단하였다.

그림 9는 실제 제작된 수냉식 RF load의 모습이다. 실제로 내부에 수돗물을 채운 후 VNA를 통해 반사계수를 측정하였다. 그림 8은 반사계수의 실제 측정 값(실선)과 시뮬레이션을 통해 구한 값(점선)을 비교한 그래프이다. 실제 측정 결과 2가지의 현상을 발견했다. 첫째, 시뮬레이션에서 보이지 않았던 주파수 약 17 MHz를 갖는 리플 현상이 발생하였다. 원인을 찾기 위해 수냉식 RF load가 $\lambda/2$ 공진기라고 가정하면, load의 길이를 l , 물의 유전율을 ϵ_r 이라고 할 때, 공진 주파수(f)는 다음과 같이 표현될 수 있다.

$$f = \frac{c}{\lambda \sqrt{\epsilon_r}} = \frac{c}{2l \sqrt{\epsilon_r}} \quad (2)$$

Load의 길이는 1,000 mm이므로, f 는 16.8 MHz가 되고,

이는 리플의 주파수와 유사한 값을 나타나게 된다. 따라서, 리플은 load 내에서 신호가 반사되어 돌아와 공진기가 형성되어 나타나는 현상이다. 즉, 수돗물인 경우 전자파가 충분히 감쇠되지 않고 일부가 반사되어 공진모드를 형성한다는 의미이다. 뒤에서 기술하겠지만, molybdate 혼합물을 사용함으로써 전자파가 충분히 감쇠되어 이러한 공진현상을 피할 수 있었다. 둘째, 시뮬레이션 결과로 예측한 것과 비교해 보았을 때, 주파수가 down shifting 되어 있었다. 이는 제작 시 발생한 길이 오차 때문에 발생한 것으로 판단된다. 따라서 중심주파수를 460 MHz로 맞춰주기 위해 transformer의 길이를 줄여주었다. Transformer의 길이를 10 mm 줄여 주었을 때, HFSS 시뮬레이션 결과 중심주파수가 약 20 MHz 정도 올라감을 보였다. 이를 적용하여, 제작된 수냉식 RF load의 중심주파수 440 MHz를 460 MHz로 이동시키기 위해 실제 transformer의 길이 10 mm를 줄여주었고, 예상대로 20 MHz가 이동되는 것을 확인할 수 있었다(그림 11). 중심주파수 약 460 MHz에서 반사계수 약 -23 dB를 얻을 수 있었고, -15 dB 기준으로 약 70 MHz의 대역폭을 갖는 것을 확인하였다.

2절에서 언급한 것과 같이, 수돗물에 molybdate를 섞은 후 Water-load의 반사계수 특성을 측정하였다. 중심주파

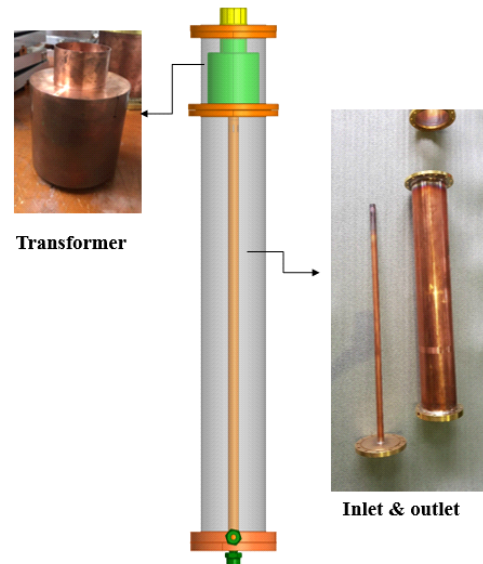


그림 9. 실제 제작된 수냉식 RF load
Fig. 9. Manufactured water-cooled RF load.

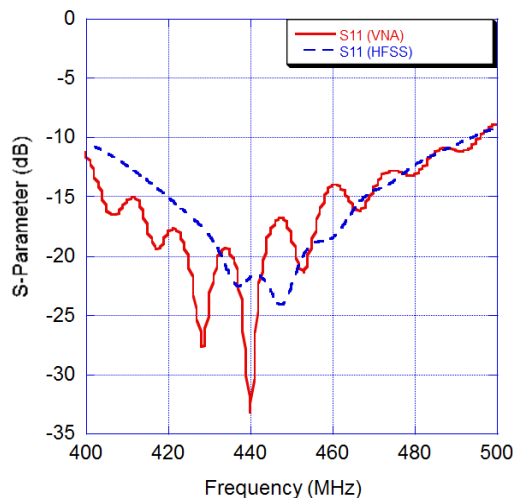


그림 10. 제작된 수냉식 RF load의 S_{11}
Fig. 10. S_{11} of manufactured water-cooled RF load.

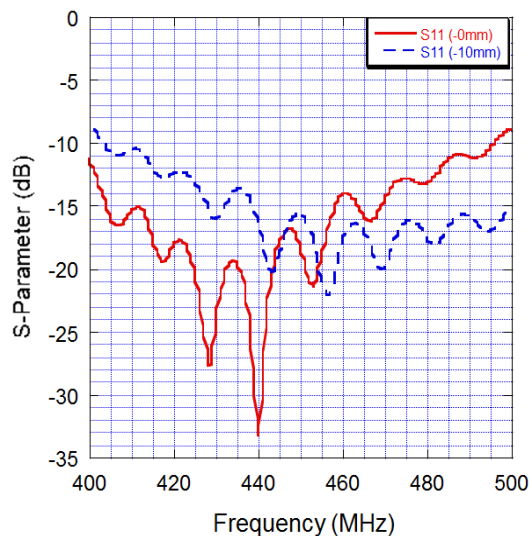


그림 11. Transformer 길이 변화에 따른 수냉식 RF load의 반사계수 특성
Fig. 11. S_{11} of water-load based on change of length of transformer.

수는 molybdate를 섞기 전(그림 12의 실선)과 동일하게 약 460 MHz에서 나타났고(그림 12의 점선), 시뮬레이션 결과와도 유사하게 나타남을 확인할 수 있다. 또한, molybdate를 섞음으로써 $\tan \delta$ 가 약 26배 커지고, 반사되는 전력이 감소하므로 리플도 크게 줄어드는 것을 관찰할 수 있다.

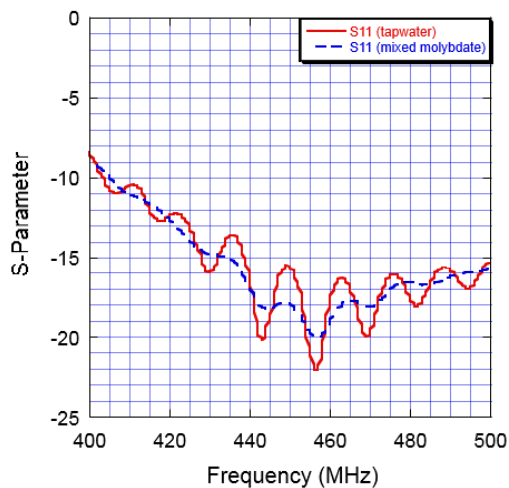


그림 12. 혼합물과 수도물을 넣었을 때의 특성 비교 그래프
Fig. 12. Comparison of the characteristics of a mixture and tap water.

V. 결 론

본 논문은 물의 유전체와 $\tan \delta$ 를 측정하고, 이를 이용하여 수냉식 RF load를 설계 제작 및 특성을 측정하였다. 유전체와 $\tan \delta$ 를 구하기 위해 공기, 증류수, 메탄올, 아세톤을 기준 물질로 선택하였고, 이를 통해 수식을 구하였다. Load에 high power가 인가되면 물의 온도가 올라감에 따라 유전율과 $\tan \delta$ 의 특성도 변하게 되므로, 온도의 변화에 따른 유전율과 $\tan \delta$ 의 변화를 관찰하였다. 또한, load의 길이를 줄이기 위해 감쇠 즉, 큰 $\tan \delta$ 값을 갖는 molybdate를 혼합해 주어 농도와 온도에 따른 유전율과 $\tan \delta$ 변화도 관찰하였다. 그 결과, molybdate 혼합물의 $\tan \delta$ 는 수도물의 약 26배 이상 높은 것을 확인하였다. 또한, 온도가 증가함에 따라 물질의 유전율은 감소하는 추세를 보이며, $\tan \delta$ 은 처음에는 감소하다가 온도가 높아지면 증가와 감소를 반복하는 경향을 보였다. 이러한 특성을 이용해 수냉식 RF load를 설계 및 제작하였다. Load를 수도물로 채운 후 반사계수 특성을 측정한 결과, 리플이 발생하였고, 수도물에 molybdate를 혼합하여 준 결과 리플이 크게 줄어들었다.

현재, high power 결합 시스템은 개발 중이고, 추후에 시스템에 수냉식 RF load를 넣어 high power test를 진행

할 예정이다^[5].

References

- [1] K. Ebihara, H. Nakanishi, and E. Ezura, "RF high power water-loads for KEKB," in *Proceedings of the Asian Particle Accelerator Conference*, Beijing, 2001, pp. 633-635.
- [2] M. Ebert, F. R. Ullrich, "Glycol substitute for high power RF waterloads," in *Proceedings of the 2005 Particle Accelerator Conference*, Knoxville, TN, May 2005, pp. 841-843.
- [3] E. Eves, V. Yakovlev, "Analysis of operational regimes of a high power water load," *Journal of Microwave Power & Electromagnetic Energy*, vol. 37, no. 3, pp. 127-144, 2002.
- [4] F. T. Ulaby, T. Bengal, J. East, M. C. Dobson, J. Garvin, and D. Evans, "Microwave dielectric spectrum of rocks," The University of Michigan, NASA/GSFC Grant NAG-5 843 and JPL Contract 947450, Mar. 1988.
- [5] S. Park, K. Jang, B. Kim, J. Park, and J. Choi, "Experiments on a 80 kW power combiner using RF LDMOS power transistors," in *2018 Asia-Pacific Microwave Conference (APMC)*, Kyoto, Nov. 2018, pp. 141-143.

허 예 림 [광운대학교/석사과정]

<https://orcid.org/0000-0002-0811-7276>



2019년 2월: 광운대학교 전자융합공학과 (공학사)
2019년 2월~현재: 광운대학교 전자융합공학과 석사과정
[주 관심분야] 고출력 증폭기, RF 회로설계 등

박 수 연 [삼성전자/사원]

<https://orcid.org/0000-0003-3903-2969>



2015년 8월: 한국해양대학교 전파공학과 (공학사)
2019년 2월: 광운대학교 전파공학과 (공학 석사)
2019년 6월~현재: 삼성전자 네트워크 사업부 사원
[주 관심분야] 고출력 증폭기, RF 회로설계, Cavity Combiner 등

이 철 언 [삼성전자/사원]

<https://orcid.org/0000-0002-5710-9731>



2019년 2월: 광운대학교 전자융합공학과 (공학사)
2019년 6월~현재: 삼성전자 네트워크 사업부 사원
[주 관심분야] 고출력 증폭기, RF 회로설계 등

최 진 주 [광운대학교/교수]

<https://orcid.org/0000-0002-8016-7841>



1983년 8월: 서울대학교 물리교육학과 (이학사)
1985년 8월: 미국 Georgia State University 물리학과 (이학석사)
1991년 8월: 미국 University of Michigan 핵공학과 (공학박사)
1991년 5월~1997년 8월: 미국 해군연구소 (NRL) 연구원

1997년 9월~현재: 광운대학교 전자융합공학과 교수
[주 관심분야] RF 회로 설계, 고출력 증폭기, Vacuum Tube Amplifier 등