

ISM 대역 응용분야에 사용되는 13.56 MHz 5kW RF 제너레이터 구현

Implementation of a 13.56 MHz 5kW RF Generator for ISM Band Applications

윤영철^{1*} · 김영²

¹가톨릭관동대학교 전자공학과

²금오공과대학교 전자공학부

Young-Chul Yoon^{1*} · Young Kim²

¹Department of Electronic Engineering, Catholic Kwandong University, Gangwon-do 25601, Korea

²School of Electronic Engineering, Kumoh National Institute of Technology, Gyeongsangbuk-do 39177, Korea

[요 약]

본 논문은 ISM 밴드 응용분야에 사용되는 13.56 MHz, 5 kW RF 제너레이터의 구현에 대한 내용이다. 이 제너레이터의 구성은 드라이브 증폭기와 LDMOS 1.25 kW 트랜지스터를 클래스 AB 푸시풀 증폭기로 구현한 모듈을 바탕으로 4개의 모듈을 윌킨슨 형태의 전송선로 변환기를 이용하여 결합하는 구조를 갖고 있다. 이 제너레이터는 선형성보다는 높은 출력과 효율을 얻는 것이 중요하며, 트랜지스터에서 발생하는 열은 워터 쿨링에 의한 수냉식 방법을 선택하여 외부로 배출하였다. 또한, 결합기와 저역통과 필터의 결합 그리고 출력 및 반사 신호를 검출하는 보호회로를 삽입하였다. 이렇게 구현된 RF 제너레이터는 포화 전력레벨 5.33 kW 출력에서 79 %의 효율을 얻었다.

[Abstract]

This paper describes implementation of a 13.56 MHz, 5 kW RF high power generator for ISM band applications. This RF generator consists of four LDMOS modules of 1.25kW class-AB push-pull power amplifier with drive amplifier and its outputs are combined by using Wilkinson type transmission-line transformers. Its generator has a high efficiency and output power better than linearity. In order to discharge power transistor heats, we used on water cooled copper plate. Also, these have a composite circuit of combiner and low-pass filter and safety circuit to detector over and reflected power. The RF generator has achieved a efficiency of 79 % at 5.33 kW of saturated power level experimentally.

Key word : ISM band, 13.56 MHz amplifier, 5 kW high power amplifier, Water cooling.

<https://doi.org/10.12673/jant.2016.20.6.556>



This is an Open Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0/>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

Received 9 November 2016 Revised 25 November 2016
Accepted (Publication) 21 December 2016 (30 December 2016)

*Corresponding Author; Young Kim

Tel: +82-54-478-7506

E-mail: youngk@kumoh.ac.kr

I. 서 론

전파를 응용한 장비에는 정보전송을 목적으로 하는 통신용 장비와 그 외의 비통신용 장비로 구분할 수 있으며, 비통신용 전파 응용장비는 산업, 과학, 의료 등의 분야에서 널리 사용되고 있고, 이러한 분야에서 누구나 전파를 사용할 수 있도록 모든 나라에서 ISM (industry, science, and medical) 대역을 정의해 놓고 있다[1-2].

본 연구는 고주파 고전력을 필요로 하는 플라즈마 방전용 [3]이나 무선 전력전송 [4-7] 등에서 사용이 가능한 13.56 MHz의 5 kW RF 제너레이터를 설계, 제작한 내용이다.

비통신용 RF 장비인 RF 제너레이터는 통신용 증폭기에서 요구되는 선형성 보다는 고효율과 높은 안정성을 요구하기 때문에 이것에 초점을 맞춰 설계하였으며, 전력 증폭기의 열전도성을 개선하기 위하여 고전력 LDMOS를 구리 방열판에 직접 납땜하여 고정시켰다. 이러한 방식은 전기적인 접지효과를 개선시켜줌으로서 효율도 함께 좋아지는 효과를 얻을 수 있다. 다만 구조적으로 고전력 LDMOS의 교환이 쉽지 않으므로 높은 신뢰성을 갖도록 설계하는 것이 무엇보다 중요하다.

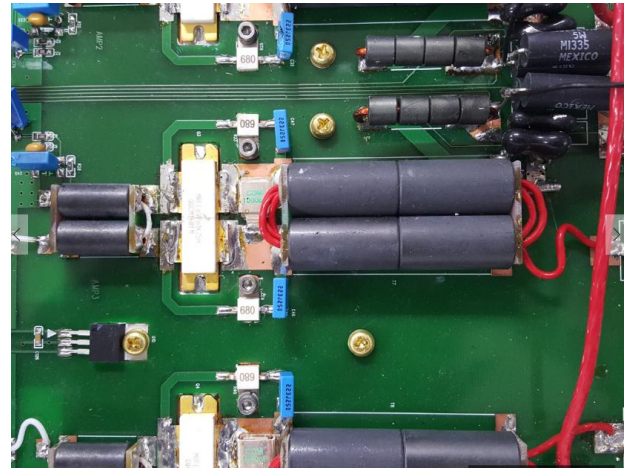
이러한 고출력 제너레이터는 고출력 반도체 소자 내부의 칩에서 열이 집중적으로 발생하므로 이를 효과적으로 냉각시키기 위해서 트랜지스터 바로 아래에 물로 냉각시킬 수 있는 파이프를 삽입하여 열을 방출시킴으로서 효율을 높일 수 있는 방법을 선택하였다[8]. 따라서 각각의 고출력 LDMOS 증폭소자를 먼저 소형 방열판에 직접 납땜하고[9], 이것을 물이 통과하는 파이프를 삽입한 방열판에 고정시키는 방법을 사용하여 전기적 효율을 최대로 얻을 수 있도록 설계하였다.

이 RF 제너레이터는 먼저 드라이브 증폭기와 포화 전력 1.25 kW를 얻을 수 있는 NXP사 LDMOS로 전력증폭기를 설계한 후, 이 출력을 2개 결합하여 2.5 kW를 만들고 결합된 전력을 다시 결합하는 방식으로 5 kW의 출력을 얻었다.

또한, 출력에 사용한 분배기와 결합기는 페라이트 토로이달 코어를 사용한 전송선로 트랜스포머로 구성하였으며[10], 최종 결합된 출력 이후에는 저역통과 필터를 사용하여 고조파 성분과 기생성분을 제거하였다.

마지막으로 저역통과 필터 출력과 최종 출력 커넥터 사이에 출력과 반사 전력을 검출하여 보호회로를 삽입하기 위한 방향성 결합기를 삽입하여 구성하였다.

II. RF 제너레이터의 구성



(a)



(b)

그림 1. (a) 1.25 kW LDMOS HPA모듈과 (b) 모듈 출력특성
Fig. 1. (a) 1.25 kW LDMOS HPA Module (b) Module output characteristics.

2-1 AB급 푸시풀 전력 증폭기

제너레이터의 출력을 얻기 위한 고전력 트랜지스터는 NXP사 LDMOS인 MRFE6VP61K25H를 이용하여 1.25 kW 전력증폭기를 설계하였다. 이 트랜지스터를 구동하는 입력 전력은 최종 트랜지스터의 이득이 26 dB를 가정하면 3~4 W 정도가 필요하며, 4개로 구성된 증폭기를 구동하기 위해서는 출력이 20 W 이상이 요구된다. 따라서 최종 트랜지스터를 구동하는 드라이버 단으로는 25 W급 MRFE6VS25를 사용하였다.

높은 출력을 얻기 위해 이 두 개의 트랜지스터를 병렬로 묶어 사용하는 경우엔 부하저항이 반으로 줄어들어 정합회로를 구성하기 쉽지 않지만, 이를 푸시풀로 묶으면 부하저항이 두 배로 커지므로 보다 쉽게 출력 정합회로를 구성할 수 있다.

고출력 AB급 푸시풀 증폭기 회로는 LDMOS 제조사에서

제공하는 회로를 참조하여 제작하였다. 이때, 직류전원은 출력 트랜스포머의 센터 탭을 통하여 인가되며, 출력 정합회로에는 페라이트 코어 트랜스포머를 사용하였고, 코어를 이용한 트랜스포머에서 발생하는 유도성 성분을 보완하기 위하여 외부에 커패시터로 공진시켜 특성을 보완한다. 이때 사용된 커패시터는 두개의 드레인 사이에 연결하여 고조파 성분을 제거하는 역할을 겸하며, 정합특성 개선은 트랜스포머 뒤에 LC회로를 추가하여 조정하였다.

그림 1은 단일 LDMOS 디바이스로 구성된 1.25 kW 전력 증폭기의 사진과 출력 특성이다.

증폭기의 출력은 단일소자에서 약 1.4 kW를 얻었으며, 이것을 4개를 연결할 경우 발생하는 손실을 고려해도 충분히 5 kW 출력을 얻을 수 있었다.

증폭기의 드레인에 연결되는 출력 트랜스포머는 RF 출력과 40 A 정도의 큰 직류가 함께 흐르므로, 포화 자속이 매우 크고 손실이 작은 재질을 택하여야만 열 발생량을 줄일 수 있다. 본 연구에는 Fair-Rite 사의 #67 재질을 선택하였으며, 이 재질의 특성은 #61 보다 투자율은 작으나 손실이 훨씬 작은 특성을 갖고 있다.

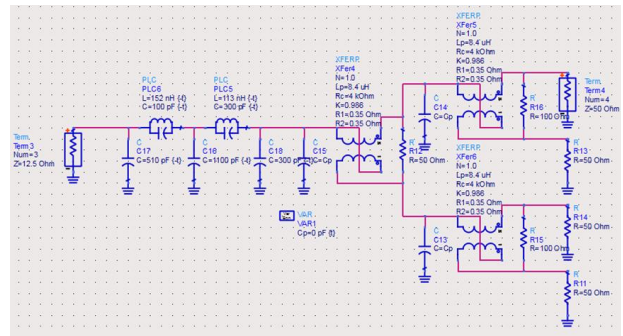
2-2 전력 결합기 와 저역통과 필터 설계

13.56 MHz 전력 결합기는 페라이트 토로이달 코어를 이용하여 전송선로 트랜스포머로 구성하였다.

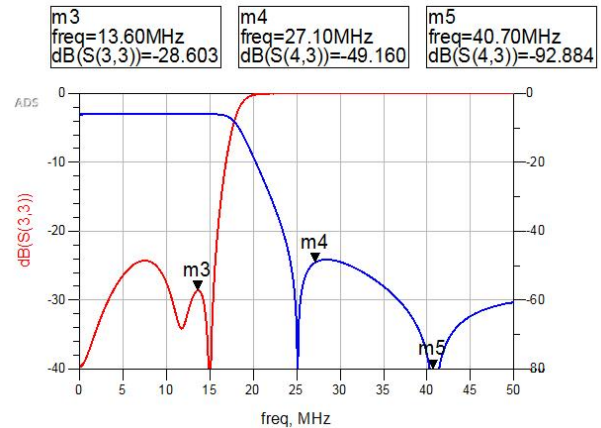
결합단자에서 신호가 들어와 동일 출력으로 나뉘지는 경우나 동일 입력이 들어와 결합하는 경우 모두 코어에는 자력선이 발생하지 않으므로 코어의 손실은 중요하지 않다. 따라서 전송선로 전력결합기용 코어는 투자율이 큰 #61 재질을 사용하였다[11]. 이 때 4 개의 고풍력 증폭기 출력은 진폭과 위상이 서로 조금씩 다르기 때문에 미세한 조정 없이 서로 연결하면 내부 100 Ω 저항에서 많은 열이 발생할 수 있으므로 방열에 특히 주의하였다.

1.25 kW의 출력을 갖는 전력증폭기는 50 Ω 부하에 정합되도록 설계되어 있으므로, 50 Ω 출력의 2개의 전력증폭기를 결합하면 출력 임피던스는 25 Ω이 되고, 다시 이 출력 2개를 결합시키면 임피던스는 12.5 Ω으로 낮아진다. 이를 다시 50 Ω으로 정합을 시켜야하는데, 본 논문에서는 증폭기 출력 뒤에 연결되는 저역통과 필터의 입력 임피던스를 12.5 Ω, 출력 임피던스를 50 Ω으로 설계하여 정합시켰다. 이렇게 설계할 경우 저역통과 필터 특성은 13.56 MHz 근방에서 최적화되도록 튜닝 해주어야 한다.

그림 2와 3에서는 저역통과 필터와 결합기가 결합된 시뮬레이션 회로와 제작 사진 및 측정값을 나타낸 것으로, 저역통과 필터가 대역통과 필터의 특성을 보이지만 13.56 MHz 근방에서 정합이 이루어지도록 튜닝하여 사용하였다.



(a)



(b)

그림 2. 저역통과 필터와 전력결합기 결합 특성 (a) 회로도 (b) 시뮬레이션 결과

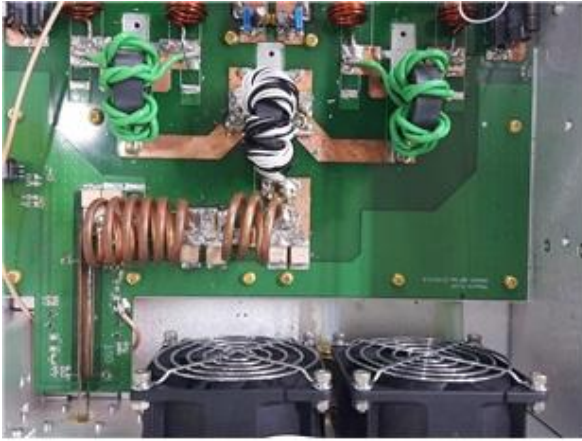
Fig. 2. Combine characteristic of low-pass filter and power combiner (a) schematic (b) simulation results.

이때 삽입손실은 측정결과 약 0.2 ~ 0.3 dB가 측정되었지만 실제 증폭기의 출력 5 kW 이상의 고풍력이 통과하면 코어의 자기포화에 의한 열 손실과 코일의 표피효과에 의해 더 큰 손실이 만들어짐을 알 수 있었다.

III. 전력증폭기 실험결과

그림 4의 사진은 1.25 kW 전력증폭기 4개를 결합한 5 kW 전력증폭기의 PCB 조립된 사진이다.

5 kW 출력을 얻기 위해서 전력증폭기 4개의 출력이 동일해야만 전력 결합기 내부 저항에서 손실이 최소가 되므로 튜닝 작업이 필요하였다. 또한, 증폭기의 출력은 드레인 전류에 비례하므로 각각의 게이트 바이어스 전압을 조정하여 드레인에 흐르는 직류 전류를 동일하게 조정하였다. 출력 전력을 확인하기 위하여 최종 출력에 30 dB 방향성 결합기를 연결하여 파워미터로 연결하였고 또한, 출력 파형을 관찰하기 위해서 40 dB 방향성결합기를 스펙트럼 분석기에 연결하여 측정하였다.



(a)



(b)

그림 3. 전력결합기와 저역통과 필터 결합 특성 (a) 사진 (b) S_{11} , S_{21} 특성

Fig. 3. Combine characteristic of power combiner and low-pass filter (a) photograph, (b) S_{11} , S_{21} characteristics.

13.56 MHz 신호 파형을 측정하는 경우 접지선을 가능한 한 짧게 하여 오실로스코프 프루브의 커패시터스 영향을 최소화 하였다. 고출력의 경우에서 측정할 때에는 커패시터스의 영향으로 전력이 누수되면서 프루브 또는 계측기가 영향을 받을 수 있다. 13.56 MHz 입출력 파형은 그림 5에 나타내었다.

4개의 전력증폭기는 각각 전원전압 48 V에 대하여 1.25 kW 출력 근방에서 최고 효율을 갖도록 조정하였다. 출력 트랜지스터 드레인에 흐르는 전류의 합은 140 A (약 6.76 kW)로 측정되었으며, 이 때 RF 출력 5.33 kW를 얻어 약 79%의 효율을 얻었다. 또한 고조파를 포함한 기생성분들도 기본파의 -55 dBc 이하로 측정되었다. 이것은 그림 6의 스펙트럼 분석기 파형을 보면 알 수 있다.

여기서 연구된 5 kW RF 제너레이터는 플라즈마 챔버와 같은 응용분야에 적용할 경우, 부하 임피던스가 단락되거나

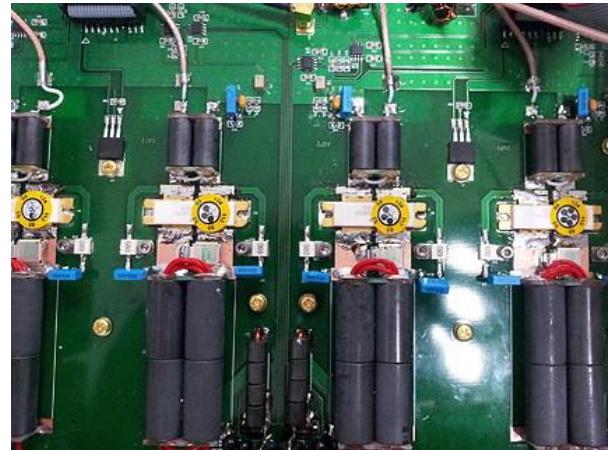


그림 4. 1.25 kW 4개 모듈로 구성된 전력증폭기

Fig. 4. Power amplifier with four 1.25 kW LDMOS module.

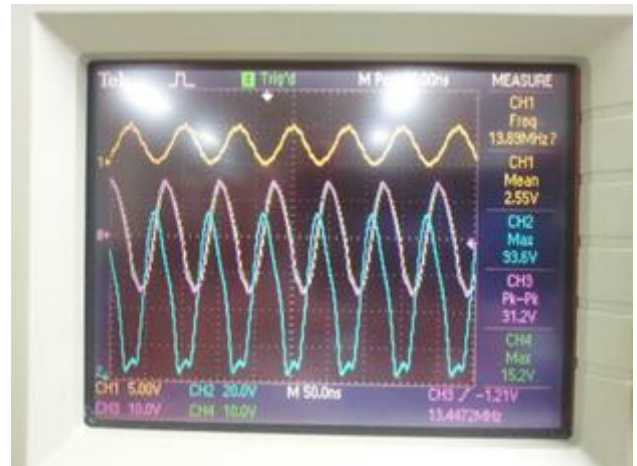


그림 5. 13.56 MHz 입출력 파형

Fig. 5. 13.56 MHz in/out waveform.

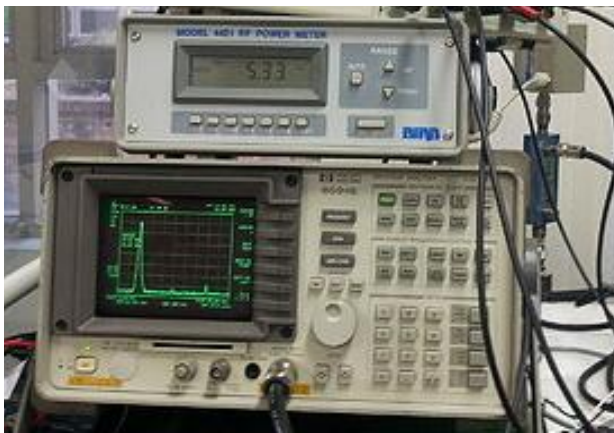
개방되는 극한 상황에 대해서도 정상적으로 동작하여야 한다. 본 연구에 사용된 LDMOS는 VSWR 65:1의 부하에서도 견디는 Rugged 소자이지만, 개방이나 단락 상태에서의 큰 반사전력이 발생하는 경우 엄청난 열이 트랜지스터에서 발생하므로, 최대한 빨리 방열시키고 바로 출력을 차단하는 보호 회로를 설치하였다.

일반적인 장비의 경우 13.56 MHz의 대역에서는 출력 전력과 반사 전력을 측정하기 위하여 VSWR bridge를 많이 사용하나 본 논문에서는 보다 정확한 전력측정을 위하여 듀얼 방향성 결합기를 PCB 위에 제작하였다. 이때 설계된 결합기의 출력 마이크로스트립 선로 폭이 너무 좁아 높은 출력을 감당하기 어려워 선로위에 동판을 세워 붙여놓음으로서 출력 전류를 감당하도록 하였다. 이 방향성 결합기로 출력과 반사 전력을 측정하여 보호회로가 동작하도록 하였다.

그림 6은 최종적으로 완성된 5 kW RF 제너레이터의 조립 사진이다.



(a)



(b)

그림 6. 4개의 LDMOS 모듈에서 측정된 (a) 전류 (b) 출력전력

Fig. 6. Four LDMOS module (a) measured current (b) output power.

IV. 결 론

본 논문에서는 1.25 kW급 LDMOS 4개를 결합하여 수냉식 5 kW 출력의 RF 제너레이터를 설계 및 제작하였다.

개발된 RF 제너레이터는 고효율과 높은 안정성에 초점을 맞춰 설계하였으며, 열 전도도를 개선하기 위하여 동 방열판에 직접 트랜지스터를 납땜하여 고정시켰다.

출력을 감시하는 방향성 결합기, 저역통과 필터등을 설계하여 5 kW에서 79 %의 효율을 갖는 13.56 MHz ISM대역의 RF 제너레이터를 개발하였다.

이렇게 개발된 RF 제너레이터는 반도체 식각 장비에 적용할 수 있으며 향후 더 높은 출력의 전력증폭기 개발에 유용하게 활용될 것으로 판단된다.

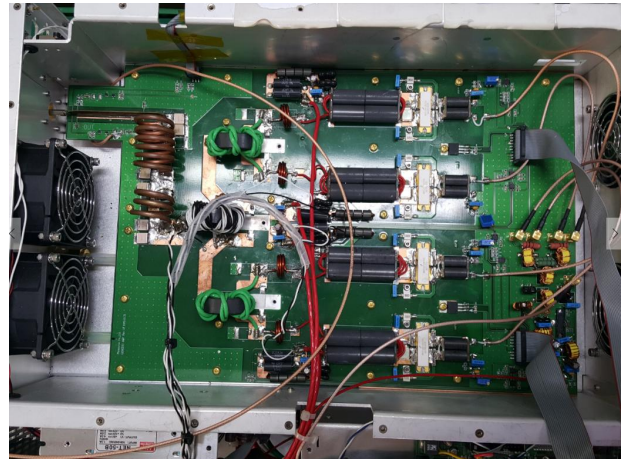


그림 7. 5 kW RF 제너레이터 사진

Fig. 7. Photograph of 5 kW RF generator.

감사의 글

본 연구는 (주) 플라소스의 지원을 받아 수행된 연구결과입니다.

참고 문헌

- [1] Y. S. Kim, In non-communication, state survey of RF application equipment and grouping system research, Korea Radio Promotion Association, KORPA Research 2007-08, 2008.
- [2] H. J. Lim and M. H. Lee, "In advanced non-communication, state survey of RF application equipment and technology trend," *Korea Communications Agency*, Vol. 72, pp. 44-62, 2014.
- [3] G. Y. Yum, *Plasma Etching Technology*, 1-st ed. Goyang, Korea: Publishing YOUNG, 2012.
- [4] A. P. Sample, D. A. Meyer, and J. R. Smith, "Analysis, experimental results, and range adaptation of magnetically coupled resonators for wireless power transfer," *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, Vol. 58, No. 2, pp. 544-554, Feb. 2011.
- [5] K. Banawan, and S. Ulukus, "MIMO wiretap channel under receiver-side power constraints with applications to wireless power transfer and cognitive radio," *IEEE Transactions on Communications*, Vol. 64, No. 9, pp. 3872-3885, Sep. 2016.
- [6] M. Khalilian, S. G. Rosu, V. Cirimele, P. Guglielmi, and R. Ruffo, "Load identification in dynamic wireless power transfer system utilizing current injection in the transmitting

coil,” in *Wireless Power Transfer Conference (WPTC)*, Aveiro: Portugal, 2016.

[7] F. Musavi and W. Eberle, “Overview of wireless power transfer technologies for electric vehicle battery charging,” *IET Power Electronics*, Vol. 7, No. 1, pp. 60-66, 2014.

[8] M. A. Laughton and D. F. Warne, *Electrical Engineer’s Reference Book*, 16-th ed. Burlington, MA: Elsevier Science,

2013.

[9] K. Nelson, Q. Li, L. Li, and M. Shah, Solder reflow attach method for high RF power devices in air cavity devices, NXP Application Note 1908, 2011.

[10] Y. Iwanami, *Toroidal Coils Application*, 5th ed. Tokyo, Japan: CQ Publishing Company, 2011.



윤 영 철 (Young-Chul Yoon)

1978년 2월 : 서강대학교 전자공학과 (공학사)
 1982년 2월 : 서강대학교 대학원 전자공학과 (공학석사)
 1989년 2월 : 서강대학교 대학원 전자공학과 (공학박사)
 1987년 9월 ~ 현재 : 가톨릭관동대학교 전자공학과 교수
 ※ 관심분야 : RF 및 Microwave 회로설계



김 영 (Young Kim)

1988년 2월 : 서강대학교 전자공학과 (공학석사), 2002년 8월 : 서강대학교 대학원 전자공학과 (공학박사)
 1988년 1월 ~ 1993년 5월 : 이즈텔 시스템즈(주) 연구소 선임연구원
 1993년 6월 ~ 1998년 2월 : 삼성전자(주) 정보통신사업본부 선임연구원
 1998년 3월 ~ 2003년 2월 : 두원공과대학 정보통신과 조교수
 2003년 3월 ~ 현재 : 금오공과대학교 전자공학부 교수
 ※ 관심분야 : RF 및 Microwave 회로해석 및 설계, 전력 증폭기 및 선형화기 설계