

## 입자 가속기용 수냉식 고전력 증폭기 구현

# Implementation of An Water-Cooled High Power Amplifier for Particle Accelerator

윤영철<sup>1</sup> · 김영<sup>2\*</sup>

<sup>1</sup>가톨릭관동대학교 전자공학과

<sup>2</sup>금오공과대학교 전자공학부

Young-Chul Yoon<sup>1\*</sup> · Young Kim<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Department of Electronic Engineering, Catholic Kwandong University, Gangwon-do 25601, Korea

<sup>2</sup>School of Electronic Engineering, Kumoh National Institute of Technology, Gyeongsangbuk-do 39177, Korea

### [요 약]

본 논문은 입자 가속기에 이용되는 165 MHz, 5 kW 고전력 증폭기의 제작에 대한 내용을 서술하였다. 이 고전력 증폭기 구성은 주 증폭기를 구동할 수 있는 드라이브 증폭기 모듈, 16개의 600 W 클래스 AB 푸쉬풀 증폭기 모듈 그리고 이 모듈 출력을 분배 또는 결합하기 위해 집중소자 LC로 구현한 입출력의 일킨슨 결합기로 구성되어 있다. 그리고 정상적인 출력과 부하에서 반사되는 전력을 감시하여 증폭기를 보호하기 위한 방향성 결합기가 구성되어있으며, 600 W 주 증폭기는 입력 전원에 의해서 발생하는 열을 방출시키기 위해서 방열판 밑에 물을 통과시키는 관을 넣어 방열하는 워터 쿨링 방법을 사용하였다. 여기서 구현된 증폭기는 중심주파수 165 MHz에서 포화 전력레벨이 5.0 kW 출력레벨에서 62.5 %의 효율을 얻었다.

### [Abstract]

This paper describes implementation of a 165 MHz, 5 kW RF high power amplifier (HPA) for particle accelerator applications. The HPA consists of a drive amplifier for main amplifiers driving, sixteen 600 W class-AB push-pull power amplifier pallets and Wilkinson power divider/combiner using lumped LC components, which are divided/combined power amplifier pallet outputs. To detected the amplifier circuit of normal and reflected output power conditions, we used a bidirectional coupler. To radiate heat of main power amplifier, we were used an water-cooled copper plates to go through a water for radiation of heat. The HPA of center frequency 165 MHz has archived an efficiency of 62.5 % at 5 kW of power level experimentally.

**Key word** : 165 MHz amplifier, 5 kW high power amplifier, Class AB, Push-pull, Water cooling.

<https://doi.org/10.12673/jant.2017.21.1.66>



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 30 December 2016; Revised 2 February 2017  
Accepted (Publication) 9 February 2017 (28 February 2017)

Corresponding Author; Young Kim

Tel: +82-54-478-7506

E-mail: [youngk@kumoh.ac.kr](mailto:youngk@kumoh.ac.kr)

## 1. 서 론

통신용 장비는 정보전달을 위하여 증폭기의 선형성과 이득조절 등의 기능이 요구되는 반면, 비통신용 응용장비는 최대출력에서 안정성과 높은 효율 등이 요구된다. 이러한 비통신용 장비에는 입자 가속기와 산업, 과학, 의료, 국방 등의 분야에서 사용되는 고출력 전력증폭기가 존재한다 [1],[2].

본 연구는 165 MHz 주파수를 사용하는 입자 가속기에서 요구하는 RF 출력 5 kW를 만족하는 증폭기를 설계, 제작하고 성능을 측정하여 향후 수 백 kW 급으로 출력을 올린 증폭기를 개발 할 수 있는 방법을 검토하고자 한다[3],[4]. 여기서 사용한 주 증폭소자는 NXP 사의 600 W급 LDMOS인 MRF6VP2600H를 사용하였고, 이 트랜지스터를 이용하여 푸시풀 AB급 증폭기를 구성한 팔렛을 만들었으며, 증폭기 팔렛을 8 개를 묶어 3.4 kW 출력이 나오도록 증폭기 모듈을 만들었다. 이 3.4 kW 증폭기 모듈 두 개를 결합하여 5 kW 이상의 출력이 나올 수 있도록 증폭기를 설계하였다.

이 5 kW급 전력증폭기는 반도체 소자로 구성되어 있으며, 증폭기는 높은 효율을 만족하여도 단위 면적당 많은 열이 발생하게 되는데, 열을 효과적으로 방출하기 위해서는 열전도도가 높은 물을 이용한 냉각 방법으로 접근하는 것이 바람직하다. 또한, 주 증폭기 소자에서 방출되는 열을 효과적으로 방출시키기 위해서 소자와 방열판 사이에 첨단 그래핀 소재의 방열접착제 (열전도도 ~100 W/mK) [5]를 사용하여 열전도도를 최대한 높일 수 있도록 설계하였다.

본 논문에서 사용한 600 W급 LDMOS 소자는 독립된 300 W급 디바이스가 두 개 존재하며 사용자가 두 개의 트랜지스터를 병렬로 연결하거나 푸시풀로 연결한 형태로 설계가 가능하다. 이때 고출력 증폭기는 요구되는 부하임피던스 값이 매우 작으므로 푸시풀로 연결하여 부하임피던스 값을 두 배로 하여 하나의 증폭기 팔렛을 구성하였다.

이 증폭기 팔렛의 구성은 푸시풀 증폭기 입력에 페라이트 코어 발륜을 사용하여 신호를 분배하고, 출력은 동축케이블 발륜으로 결합시키며 출력에 미세 조정용 정합회로를 추가하였다[6]-[10].

이론적으로 증폭기 팔렛 하나에서 최대 포화전력 600 W의 출력을 얻어낼 수 있지만, 입자 가속기에서 요구하는 선형성과 효율을 고려하여 400 W 출력을 낼 수 있도록 제작하였다. 이러한 특성을 갖는 증폭기 팔렛을 결합기[11]-[14]로 결합하여 5 kW 이상 출력의 전력증폭기를 제작하였다.

여기서 사용된 윌킨슨 결합기는 집중소자인 LC 회로로 구성하면 크기를 줄이면서 동시에 고조파 신호도 감소시키는 효과를 얻을 수 있었다. 이러한 특성은 집중소자의 저주파 특성 때문에 최종 출력단에 삽입해야하는 저역통과필터를 제거할 수 있었다.

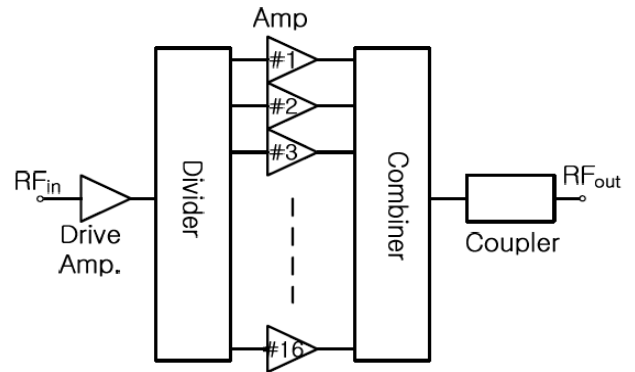


그림 1. 증폭기 전체 구성도

Fig. 1. High power amplifier block-diagram.

## II. 증폭기의 구성

### 2-1 전체 블록도

가속기용 증폭기의 전체 시스템 구성은 그림 1에 나타내었다. 증폭기의 구성은 드라이브 증폭기, 입력 윌킨슨 분배기, 주 증폭기 모듈, 출력 윌킨슨 결합기 그리고 방향성 결합기로 구성되어 있다.

### 2-2 드라이브와 푸시풀 전력 증폭기 팔렛의 기본구조

NXP사의 ISM 대역 600 W급 LDMOS인 MRF6VP2600H 소자는 단일 패키지에 300 W급 디바이스 두 개가 독립적으로 들어있어 병렬로 묶거나 푸시풀로 연결하여 600 W 이상의 출력을 얻을 수 있다. 이 소자는 24 ~ 26 dB의 이득을 갖고 있으며, 이 소자 한 개를 구동시키려면 2.5 W의 입력이 필요하므로 8개의 LDMOS를 구동하기 위한 드라이버 단 출력은 20 W 이상의 출력이 필요하여 이 특성을 만족하는 드라이브용 증폭기의 트랜지스터는 NXP 25 W급 LDMOS인 MRFE6VS25를 선정하였다.

그림 2은 증폭기의 특성을 얻기 위하여 알루미늄 방열판 위에 구현한 25 W급 드라이브 증폭기 구성 모습이다.

그림 3은 600 W 급 증폭기 회로를 구현한 팔렛으로 입력에 2:1 페라이트 코어 발륜을 사용하였으며 출력에는 플렉시블 동축케이블로 트랜스포머와 발륜을 이용하여 구성하였다. 이 팔렛은 알루미늄 방열판 위에 입, 출력 커넥터와 전원 단자를 두었다.

MRFE6VP5600H에 들어있는 300 W의 LDMOS 두 개를 트랜스포머를 이용하여 푸시풀 증폭기로 설계하였고, 바이어스는 AB급으로 공급하되 선형성을 고려하여 적절한 값으로 조정하였다.



그림 2. 25 W 드라이브 전력증폭기 팔렛  
 Fig. 2. 25 W drive power amplifier pallet.



그림 3. 600 W 전력증폭기 팔렛  
 Fig. 3. 600 W power amplifier pallet

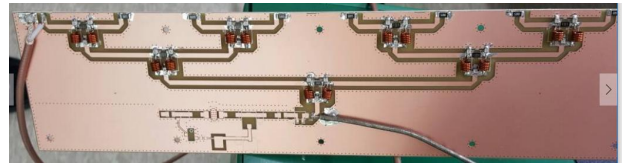
특히 증폭기 팔렛을 8개 결합한 상태에서 각각의 바이어스 전류를 조정하여 모든 팔렛의 출력 전력이 동일하게 출력되도록 하는 것이 매우 중요하였다.

직류전원은 페라이트 코어를 이용한 RFC를 통하여 인가하였고, 20 A 이상의 전류가 흐를 수 있도록 충분한 굵기의 전선을 사용하여 미세한 전압강하에 의한 출력 불균형을 예방하였다.

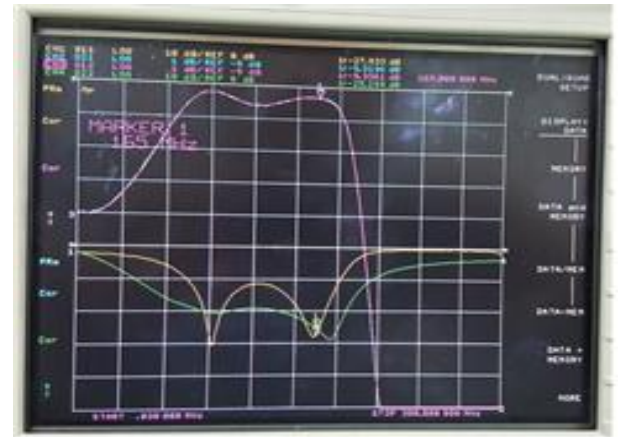
### 2-3 집중소자 LC 전력 분배기/ 결합기

주파수가 낮은 윌킨슨 전력결합기는 마이크로스트립으로 구현할 경우 전송선로의 길이가 매우 길어지고, 고출력을 전송하기 위해서는 선로의 폭이 넓어야하므로 기판도 충분히 두꺼운 것을 사용하여야 한다.

이런 마이크로스트립을 사용한 결합기 단점을 극복하기 위하여 본 연구에서는 에어 코일과 캐패시터를 이용하여 윌킨슨 분배기를 pi형태로 구성하여 사용하였다.



(a)



(b)

그림 4. 집중소자 8-way 전력분배기 (a) 구현 PCB (b) S<sub>11</sub>, S<sub>21</sub> 특성

Fig. 4. 8-way power divider using lumped element (a) fabricated PCB (b) S<sub>11</sub>, S<sub>21</sub> characteristic.

그림 4은 8-way 전력분배기 구현 PCB와 전달특성을 나타낸 것으로, FR-4 에폭시 PCB 위에 집중소자 에어 코일과 캐패시터를 이용하여 구현한 분배기의 손실은 약 9.32 ~ 9.35 dB의 손실을 보였다. 따라서 분배기만의 삽입손실은 최대 0.35 dB로, 약 4 %의 전달 손실을 갖는다. 따라서 고출력 증폭기는 윌킨슨 분배기/결합기에서 최대 10 %의 손실을 보낼 수 있도록 설계하였다.

## III. 전력증폭기 실험결과

### 3-1 증폭기 모듈 조립

그림 5는 600 W 증폭기 팔렛 8개를 결합한 3.4 kW 전력 증폭기 모듈을 수냉 방열판에 조립한 사진이다.

구현된 전력 증폭기 및 분배기/결합기는 모두 FR-4 에폭시 재질 PCB 위에 제작하여 방열판 위에 볼트로 조립하였으며 LDMOS 트랜지스터는 그래핀 방열접착제를 사용하여 볼트로 고정하였다.

트랜지스터 8개의 출력을 손실없이 결합시키기 위해서는 모든 증폭기 팔렛의 출력에 대한 진폭과 위상이 동일하여야 하는데, 위상은 전송선로의 길이가 같다는 가정하였고 진폭



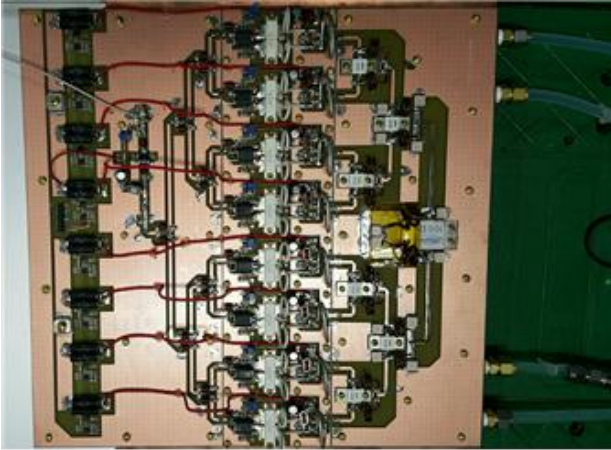


그림 5. 8개의 증폭기 팔렛과 전력 분배기/ 결합기로 구성된 수냉식 증폭기 모듈 사진

Fig. 5. Photograph of water cooled amplifier module with eight amplifier pallets and power divider/ combiner.

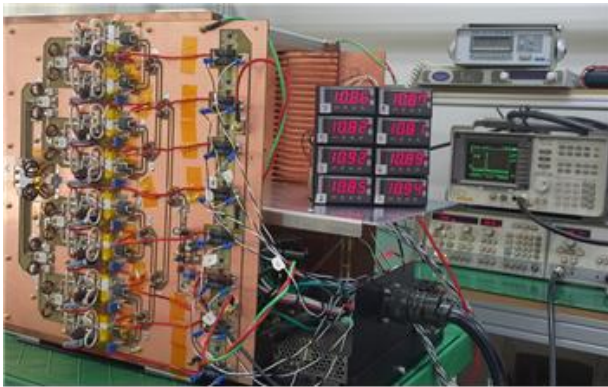


그림 6. 8개의 팔렛 출력 조정 후의 드레인 전류

Fig. 6. Drain current after output power adjust.

은 드레인에 공급되는 전원 전류가 같으면 출력도 같다는 가정하여 각 팔렛의 바이어스 전류를 조정하여 LDMOS의 드레인 전류가 동일하도록 미세 조정하였다.

8개의 증폭기 팔렛은 각각 전압 48 V에 대하여 400 W 출력에서 최고 효율을 갖도록 조정하였다. 드레인에 흐르는 8군데 전류의 합은 약 87 A로 측정되었으며, 이 때 최대 출력 3.4 kW를 얻어 약 81.5%의 효율을 얻었다. 또한 출력 필터 없이도 고조파를 포함한 기생성분이 기본파의 -55 dBc 이하로 측정되었다.

### 3-2 3.4 kW 두 개의 증폭기 모듈 결합

3.4 kW의 출력을 얻은 증폭기 모듈 두 개를 결합하기 위해서 방열판 위에 두께 3 mm의 테프론 판을 얹어놓고 그 위에 폭 9.4 mm의 동 접착 테이프를 붙여 50 Ω 전송선로를 만들고, 여기에 0.6 mm 두께의 동판 전송선로를 제작하여

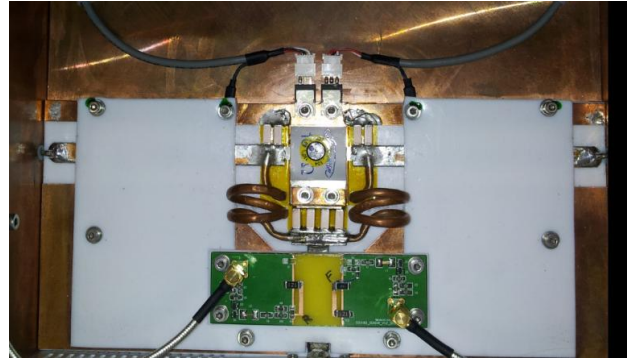


그림 7. 최종 출력 LC Wilkinson 결합기 사진

Fig. 7. Photograph of final output Wilkinson combiner.

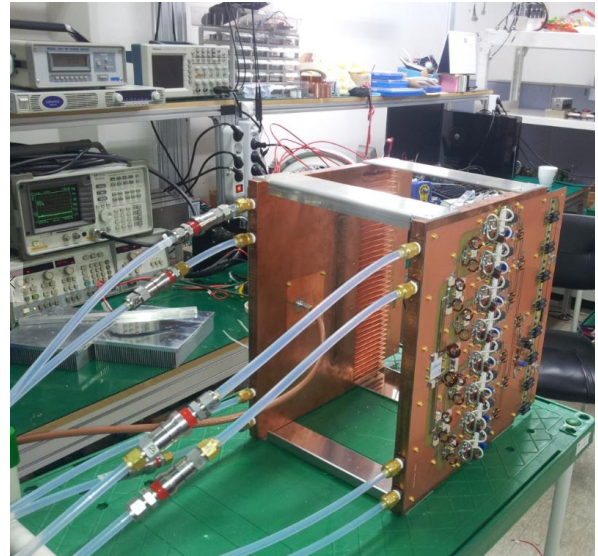


그림 8. 3.4 kW 증폭기 모듈 두 개를 좌우에 연결한 모습

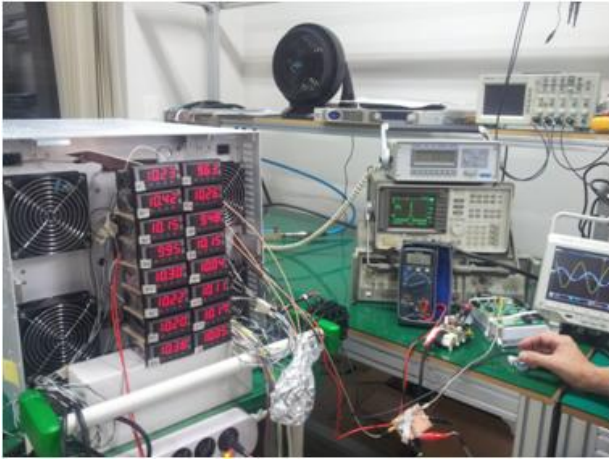
Fig. 8. Assay of two 3.4 kW power amplifier modules.

납땀하여 5 kW의 전력을 견딜 수 있도록 하였다. 3.4 kW 출력의 모듈 2 개는 집중소자로 구현한 윌킨슨 결합기로 결합하고 출력은 방향성 결합기를 거쳐 LC 콘넥터[15]로 출력되도록 하였다. 그림 7은 좌우 두 개의 방열판에 조립된 증폭기 모듈로부터 마이크로스트립 선로를 이용하여 출력을 결합시킨 윌킨슨 결합기 사진이다.

두 개의 증폭기 모듈이 결합된 후에는 16개의 LDMOS에 공급되는 전원 전류가 동일해지도록 각 디바이스의 바이어스 전류를 미세 조정하였다.

3.4 kW의 두 개의 모듈은 증폭 이득과 위상에서 많은 차이를 보이기 때문에 낮은 출력에서부터 차츰 출력을 올려가면서 전류조정을 하였다.

그림 8과 그림 9는 최종 조정된 증폭기의 조립된 상태와 전류특성 그리고 6 kW의 포화 출력을 나타내었다.



(a)



(b)

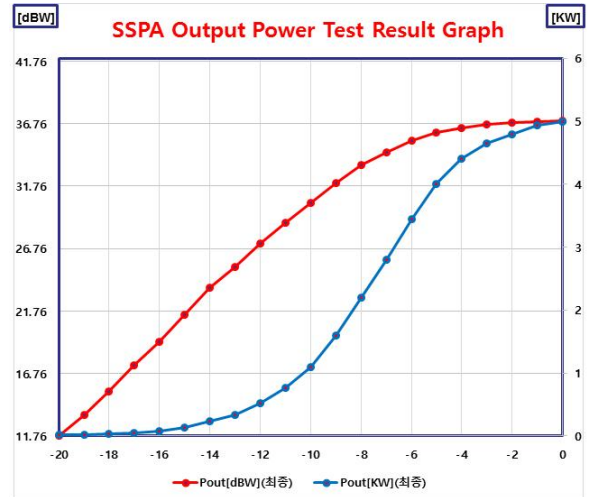
**그림 9.** 2개의 모듈로 구성된 최종 증폭기의 전류특성과 출력  
**Fig. 9.** Final amplifier characteristic (a) current (b) output power.

**3-3 출력 측정**

5 kW 고전력 RF의 주파수 스펙트럼을 관찰하고 출력을 측정하기 위하여 30 dB 및 40 dB 방향성결합기를 제작하여 사용하였다. 제작된 전력증폭기의 출력 콘넥터는 LC형이지만 방향성 결합기 등은 계측기와의 연결성 등을 고려하여 LC형 보다는 전송능력이 떨어지지만 쉽게 구할 수 있는 7/16 DIN 커넥터[16]를 사용하였다. 최종 출력 5 kW에 맞춘 증폭기의 입, 출력 이득 특성을 그림 9에 나타내었다. 전압 50 V에서 약 160 A의 전류가 흘러 전체 전력증폭기의 효율은 약 62.5 %를 얻었다.

**IV. 결 론**

본 논문에서는 NXP사 LDMOS를 사용한 클래스 AB급 푸쉬풀 600 W 증폭기 팔렛 8 개를 사용하여 수냉식 방열판



**그림 10.** 5 kW 전력증폭기의 출력 특성  
**Fig. 10.** Output characteristic of 5 kW power amplifier.

위에 증폭기 모듈을 구성한 후, 이 증폭기 모듈 두 개 연결하여 5 kW의 출력을 갖는 전력증폭기를 제작하였다.

일직선 LC 전력결합기는 3.4 kW 두 모듈에서의 출력이 동일하지 않을 뿐더러 내부 저항의 크기에 의한 기생성분으로 인하여 매우 큰 전력이 소모되었고, 최종단 전력결합기의 내부저항도 수냉식 방열판 위에 고정시켜서 튜닝 과정에서 발생하는 과도한 열을 방출시켰다.

출력이 커질수록 마이크로스트립 선로로 kW의 전력을 전송하는데 있어서 부정합이 생기면 전압, 전류의 크기가 갑자기 증가하면서 선로의 패딩이 타는 현상이 발생하므로, 이를 극복하기 위하여 마이크로스트립 선로위에 동판을 세워 보강하여 허용 전류치를 높이고, 일부부분에는 FR-4 대신테프론 기판을 삽입하여 해결하였다.

트랜지스터에서 발생하는 열을 방출시킬 수 있는 보다 좋은 방열기술이 확보된다면 적은 수의 디바이스로 작은 면적의 방열판위에 고출력의 증폭기 설계가 가능할 것으로 판단된다.

**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, 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] M. H. Chun, K. H. Park, I. H. Yu, Y. S. Lee, D. S. Kim, M. H. Seo, Y. J. Moon, J. W. Ok, M. S. Won, J. Hong, B. S. Lee, and J. Bahng, "Design study on a high power RF amplifier for the RFQ," in *Proceedings of IPAC 2015*, Richmond: VA, pp.3009-3011, 2015.

[4] R. J. Pasquinelli, "RF power sources for project X," *Project X Machine Advisory Committee*, Mar. 2012.

[5] Econinfar Holdings, MEGA Polymer Resin (MPR) [internet]. Available: <http://www.ecoinfra.com>.

[6] NXP Circuit Information: 2 Meter Amateur Reference Design, High Ruggedness N-Channel Enhancement-Mode Lateral MOSFETs, Technical Data, pp.1-16, June 2011.

[7] F. H. Raab, "Transmitter architectures for high efficiency amplification," *Green Mountain Research Company*, pp. 1-21, 2006.

[8] K.Narendra, L. Anand, L. Joshua, T. Tan and G. Boeck, "Adaptive LDMOS Power Amplifier with Constant Efficiency," in *2007 SBMO/IEEE MTT-S International Microwave & Optoelectronics Conference*, Salvador: Brazil, pp.861-864, 2007.

[9] A. Jain, D. K. Sharma, A. K. Gupta, P. R. Hannurkar and S. K. Pathak, "Compact solid state radio frequency amplifiers in kW regime for particle accelerator subsystems," *Indian Academy of Science*, Vol. 38. Part 4, pp.667-678, Aug. 2013.

[10] B. Popovic and G. Waldschmidt, "RF solid state driver for argonne light source," in *Proceedings of 2011 Particle Accelerator Conference*, New York: NY, pp. 1097-1099, 2011.

[11] F. Noriega and P. J. González, "Designing LC Wilkinson Power Splitters," *RF Design*, pp.18-24, Aug. 2002.

[12] M. M. Elsbury, P.D. Dresselhaus, N. F. Bergren, C. J. Burroughs, S. P. Benz, and Z. Popovic, "Broadband lumped-element integrated N-way power dividers for voltage standards," *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, Vol. 57, No. 8, pp. 2055-2063, Aug. 2009.

[13] Microwave101, Unequal, N-way Gysel power divider [internet]. Available: <https://microwaves101.com/encyclopedias/unequal,-n-way-gysel-power-divider>.

[14] U.H Gysel, "A new N-way power divider/combiner suitable for high-power applications," in *1975 IEEE-MTT-S International Microwave Symposium*, Palo Alto: CA, pp.116-118, May 1975.

[15] Santron, LC series RF Coaxial Connector [internet]. Available: <http://santron.com/LC-RF-coaxial-connector/>.

[16] Wikipedia, 7/16 DIN Connector [internet]. Available: [http://en.wikipedia.org/wiki/7/16\\_DIN\\_connector](http://en.wikipedia.org/wiki/7/16_DIN_connector).



**윤영철 (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



**김영 (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