

# 광대역 특성을 가지는 고출력 펄스 전력 증폭기 구현에 관한 연구

이경학\* 정회원

## A Study on the Implementation of High Power Pulse Amplifier with wide-band characteristic

Kyounghak Lee\* Regular Member

### 요 약

본 논문에서는 L-Band 대역의 항행안전시설(DME, TACAN)에 적용 가능한 광대역 High power pulsed amplifier를 구현하였다. L-Band 대역의 항행안전시설의 특성상 구현된 SSPA는 매우 높은 출력과 선형성, 효율 특성을 요구한다. 이에 본 논문에서는 변형된 class F 기법을 이용하여 효율 특성을 개선하였다. 또한 hybrid coupler를 이용한 Balance 구조와 구동부 증폭단의 비선형 특성을 이용한 anti-phase 기법, 출력부 harmonic trap 등을 이용하여 선형 특성을 개선하였다. 구현된 SSPA는 약 300MHz의 대역폭을 가지며, 1.5KW 출력과 55%의 효율 특성을 보였다.

**Key Words** : SSPA, Pulse SSPA, High Power Amplifier, NAVAID

### ABSTRACT

In this paper, High Power Pulsed Amplifier with wide-band characteristic is implemented for L-band Navigational Aid(NAVAID). Due to the characteristics of L-Band NAVAID, implemented SSPA is demanded characteristics of high RF power, high linearity and high efficiency. Therefore, in this paper, efficiency characteristic is improved by modified class F technique. And linearity characteristic is improved by balance structure using hybrid coupler, 2<sup>nd</sup> & 3<sup>rd</sup> harmonic trap and anti-phase technique using non-linear characteristics of drive amplifier. Implemented SSPA shows that bandwidth of 300MHz, RF Output power of 1.5KW and efficiency of 55%.

## I. 서 론

최근 군에서 사용된 기술들을 민간에서 사용하기 위해 공유하려는 시도가 증가하고 있다. 이러한 기술들을 여러 분야에서 추진되고 있는데, 그 중 대표적인 기술이 펄스 전력 증폭기를 이용한 레이더와 같은 기술들이다.

위에서 설명한 것과 같이 펄스 전력 증폭기를 이용한 기술로 대표적인 것은 레이더 분야이다. 현재 민과 군의 공유하고 있는 레이더 관련 기술은 L-band, S-band, x-band, Ku-band, Ka-band 대역에서 사용되고 있다. 이들 대역은 민과 군이 이동통신, 항공기나 선박 등에 대한 관제용, 기상, 위성통신 및 방송 등 다양한 분야에서 사용되어지고 있다.

기존의 고출력 RF 시스템은 1990년대 말까지도

TWT(Treveling Wave Tube), 마그네트론(Magnetron), 클라이스트론(Klystron)과 같은 진공관 형태의 증폭 소자를 사용하여 매우 높은 진압을 인가시켜 구동하였다. 이러한 형태의 기존 시스템은 부피가 크고 수명이 짧은 단점을 가진다. 2000년대에는 이러한 단점을 보완하고자 SSPA(Solid-state Power Amplifier) 기술을 연구·개발해오고 있다. SSPA는 수명시간, 유지보수 및 증폭기 동작 관점에서 우수한 특성을 가진다. 또한 광대역 주파수 구현 및 디지털 신호 처리 등의 강력한 장점을 가진다[1, 2].

항행안전시설은 항공기의 안전한 항행(이륙 및 착륙 포함)을 위한 설비이다. 그 중 L-Band의 항행안전시설은 항행 중인 항공기에 전파를 이용하여 정보를 전달하는 항법보조 시스템 역할을 한다. 특히 L-band 대역을 사용하는 항행안

※ 이 논문은 2015년도 대학교 학술연구비 지원을 받아 수행된 연구 결과임

\*남서울대학교 산학협력단(khlee@nsu.ac.kr)

접수일자 : 2016년 2월 03일, 최종재확정일자 : 2016년 03월 04일

전시설은 그 시스템의 용도와 특성상 고출력의 송출신호와 주파수 대역의 약 25% 사용하는 광대역 특성을 요구한다. L-Band의 항행안전시설(DME, TACAN 등)의 신호 규격은 국제민간항공기구(ICAO) 및 미군표준(MIL-STD)을 따른다. 보다 정확한 정보 전달을 위하여 가우시안(Gaussian) 펄스를 사용하며, 이는 신호 및 정보 분석을 위하여 일정 이상의 선형성을 요구한다. 이에 본 연구에서는 L-Band 대역의 광대역 1.5kW급 가우시안 펄스 전력증폭기를 구현하였다.

## II. Theory

Class F 증폭기는 harmonic 제어 회로가 전류 파형과 전압 파형에서 불필요한 harmonic 성분들을 제거함으로써 효율 특성을 개선하는 메카니즘을 가진다.

전류 파형에서 전압 파형이 소자에 유기되어 전력 소모가 없기 위해서는 출력단의 각 고조파들에 식 (1), (2)와 같은 부하가 연결되어야 한다[6-8].

$$Z_{even} = Short \quad (1)$$

$$Z_{odd} = Open \quad (2)$$

$$Z_{fund} = \frac{\frac{2}{T} \int_t V_{out}(t) \sin(\omega_0 t) dt}{\frac{2}{T} \int_t I_{out}(t) \sin(\omega_0 t) dt} = \frac{V_{max}}{\frac{\pi}{4} I_{max}} \quad (3)$$

$Z_{even}$ 은 짝수 고조파들에 대한 부하,  $Z_{odd}$ 은 홀수 고조파들에 대한 부하이고  $Z_{fund}$ 은 기본파에 대한 부하 임피던스이다. 기본파를 제외한 odd harmonic과 even harmonic의 전력은 식 (3)의 출력 임피던스 조건에 의해 이상적인 경우 출력에 나타나지 않는다. 이때 최대 출력전력( $P_{RF}$ )과 드레인 효율( $\eta$ )은 식 (4)과 같다.

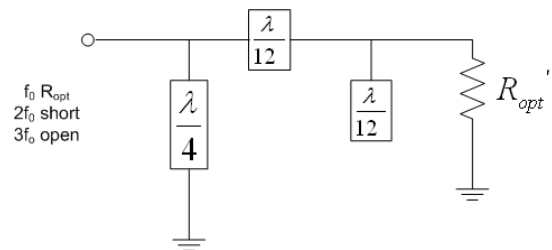
$$\eta = \frac{P_{RF}}{P_{dc}} = \frac{\frac{I_F V_s}{\pi}}{\left[ \frac{1}{T} \int_t V_{out}(t) dt \right] \left[ \frac{1}{T} \int_t I_{out}(t) dt \right]} = 100\% \quad (4)$$

이때 얻어진 최대 전력은 Class-A 또는 Class-B 동작 증폭기보다 1.27배 크며 효율도 100%로 가장 우수하다. 그러므로 높은 효율을 필요로 하는 전력 증폭기의 구현에는 Class-F 동작이 적절하다. 그러나 현실적으로 모든 harmonic을 제어하는 것이 불가능하므로 회로의 복잡성과 효율을 trade-off해서 3차 harmonic까지 제어하는 형태가 일반적이다.

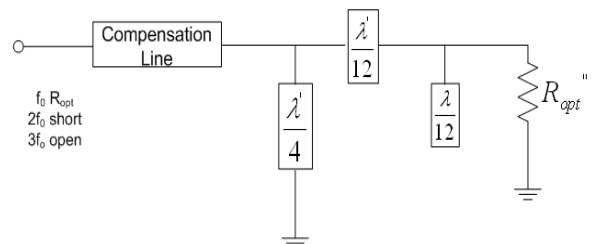
Harmonic 제어회로를 lumped 소자를 사용하여 공간기

형태로 가져갈 수도 있지만 이 경우 lumped 소자의 손실로 인해 출력단의 loss가 증가하게 된다. 본 논문에서는 transmission line을 사용하여 각 harmonic에 대해 impedance를 transformation 함으로써 출력단의 손실을 줄이고 harmonic 제어가 소자의 전류원 뒤에서 이루어지도록 하였다[6-8].

그림 1은 transmission line을 사용해 3차 harmonic까지 제어하는 회로를 보여주고 있다. 그림 1(a)의 이상적인 경우 2차 harmonic에 대해  $\lambda/4$  short stub를 사용해 short를 잡고 3차 harmonic에 대해  $\lambda/12$  open stub와  $\lambda/12$  line을 사용해 open 시킨다. 기본파에 대해서는  $R_{opt}'$ 의 부하 임피던스를 달아서 harmonic 제어 회로 앞에서 바라본 임피던스가  $R_{opt}$ 가 되게 한다. 그러나 그림 1(a)의 harmonic 제어 회로는 소자의 기생 성분들을 보상할 수 없기 때문에 class F 증폭기를 설계 했을 때 harmonic 제어가 올바르게 이루어지지 않는다. 그림 1(b)의 실제적인 경우에는 소자의 기생 성분들 중 harmonic 제어를 하는데 있어서 가장 문제가 되는 소자의 출력 capacitance 성분과 harmonic 제어 회로의 크기를 보상하기 위해 compensation line를 추가하였다. 추가적인 compensation line으로 인해 그림 1(b)의 경우에는  $\lambda/4$  short stub와  $\lambda/12$  line은 원래의 길이보다 짧아진  $\lambda'/4$  short stub와  $\lambda'/12$  line으로 설계함으로써 harmonic 제어가 올바르게 이루어 질 수 있도록 해야 한다.



(a) harmonic 제어 회로

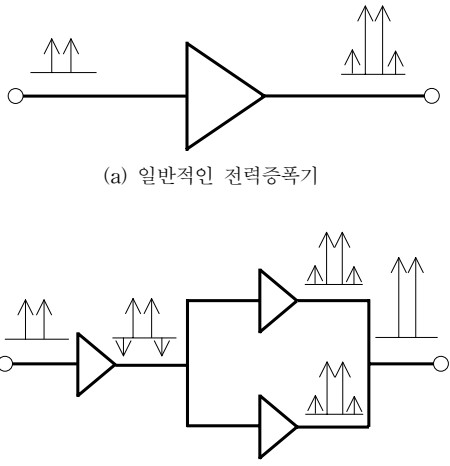


(b) 변형된 harmonic 제어 회로

그림 1. 증폭기의 harmonic 제어를 위한 회로

일반적으로 전력증폭기 설계 시 각각의 증폭기 특성이 최대전력 또는 최적화된 선형화 특성을 갖도록 적용한다. 그러나 이 방법의 경우 개선량이 제한되어 있어서 제품화 시에는 feedforward 같은 선형화 회로를 추가해야 한다. 또한 광대역폭을 갖는 대전력증폭기의 경우, 추가회로를 사용하는 기존 선형화 방식은 고출력, 광대역 특성을 만족시키려면 크기

가 커지고 비용이 많이 든다. 본 논문에서 적용한 선형화 방법은 그림 2와 같이 추가적인 선형화 회로없이 종단 증폭기의 왜곡 특성을 보상할 수 있도록 구동단 증폭기의 왜곡특성을 종단 증폭기의 왜곡특성과의 역 위상(Anti-phase)이 되도록 설계하는 것이다. 이때 구동증폭기와 종단 증폭기의 개별적 선형화 특성은 의미가 없으며, 상호 연결하여 결합되었을 때에 나타나 선형화 특성이 중요하다[9, 10].



(a) 일반적인 전력증폭기  
(b) 역 위상 왜곡신호 전력증폭기  
그림 2. 역왜곡 선형화 원리

### III. High Power SSPA 구현

다음 표 1은 항행안전시설(DME 등)에서 요구하는 성능을 고려하여 작성한 SSPA의 사양이다. 표 1의 사양은 국제 민간항공기구와 미군의 표준에 의거하여 작성되었으며, 군과 민에서 공용으로 사용이 가능하다.

표. 1 SSPA 사양

구분	사양
Peak Power	1.5kW
Frequency	960 ~ 1220 MHz (260MHz)
Stability	0.02%
Efficiency	50%
pulse spectrum	100mW @ 0.8MHz
	20mW @ 2MHz
Pulse shape	Rise time : $2.0 \pm 0.25 \mu s$
	Fall time : $2.5 \pm 0.5 \mu s$
	Duration : $3.5 \pm 0.5 \mu s$
Pulse type	Gaussian pulse

위 표 1의 사양을 바탕으로 변형된 F급 발란스 구조를 이용하여 SSPA를 설계하였다.

SSPA의 최종 출력은 약 1.5kW(61.7dBm)으로 총 3 stage로 구성된다. 각 stage의 증폭 소자들은 zero bias와 harmonic 제어 회로를 적용한 F급 전력 증폭기 구성과 최종

harmonic trap으로 구성되어 있다. 위 그림 3은 SSPA의 설계 구조를 나타낸다.

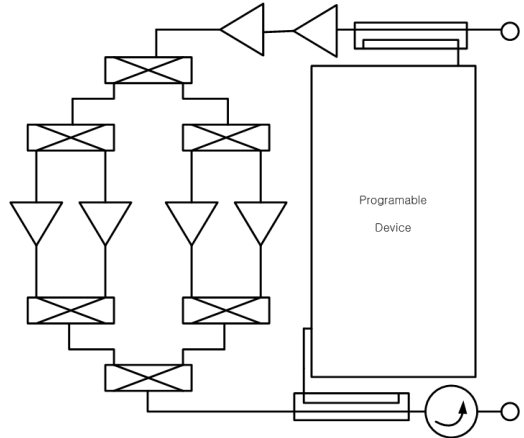


그림 3. High Power SSPA 설계 구조

설계된 SSPA의 전체 이득은 약 28dB이며, 최종 stage는 Integra 사의 600W 급 L-Band 증폭소자 4개를 사용하였다. 최종 출력 결합과 분배를 위해 하이브리드 커플러를 이용하였다[3-5]. 또한, 입력단과 출력단에 구현된 전력 증폭기의 상태 감시를 위해 방향성 결합기를 사용하였다. 방향성 결합기를 통하여 검출된 상태 정보를 Programmable device를 통하여 분석하고, 분석된 정보를 신호발생단에 전달하여 신호 상태를 보정한다. 또한 출력단의 Open 상태를 고려하여, 서클레이터를 삽입하였다.

L-Band 항행안전시설의 SSPA는 고출력을 요구하지만, 동시에 높은 선형성을 요구한다. 특히 가우시안 펄스를 신호 원으로 사용하기 때문에 높은 선형성은 필수적이다. 따라서 최종 stage의 각 증폭소자는 광대역 특성과 선형성, 고출력 특성을 고려하여 정합회로와 하모닉 트랩을 삽입하였다. 또한 펄스열드롭(pulse train droop) 방지를 위하여 각 증폭소자의 출력부에 전해질 캐패시터를 이용하였다. 그림 4는 제작된 SSPA의 실물도이다.

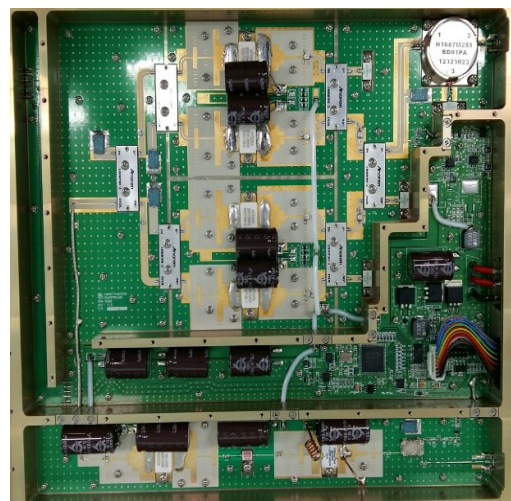


그림 4. High Power SSPA 실물도

### Ⅲ. 측정

다음 5는 구현된 SSPA의 성능 측정을 위해 구성된 측정 환경이다.

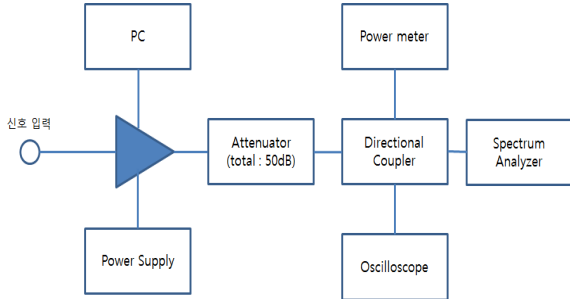
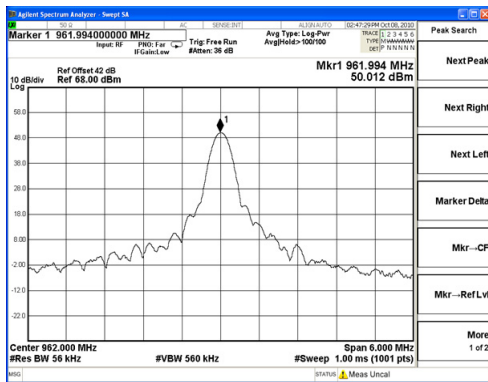


그림 5. 측정을 위한 장비 구성도

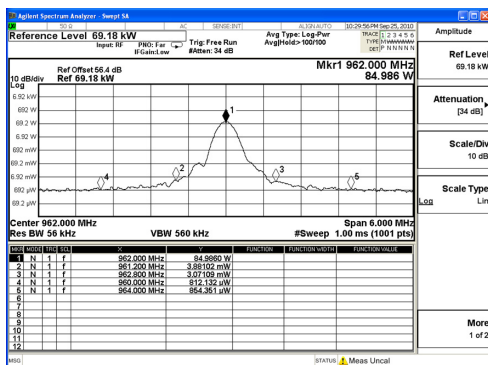
주파수와 RF spectrum을 측정하기 위하여 spectrum analyzer를 사용하였고, 최종 출력 확인을 위하여 Power meter를 이용하였다. 또한 pulse shape 측정을 위하여 oscilloscope를 사용하였다.

그림 6과 7은 주파수 안정도와 해당 주파수별 RF spectrum을 측정한 결과이다.

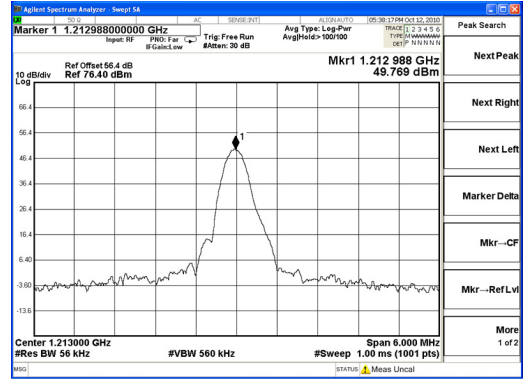
RF 성능 측정은 해당 주파수 중 대표적인 주파수를 6가지를 선택하여 측정하였다. 측정 결과 표 1에서 요구하는 사양을 충분히 만족함을 볼 수 있었다. 주파수 안정도 측면에서는 앞쪽 주파수 대역에서는 약 6kHz 가량의 편차가 나타났고,



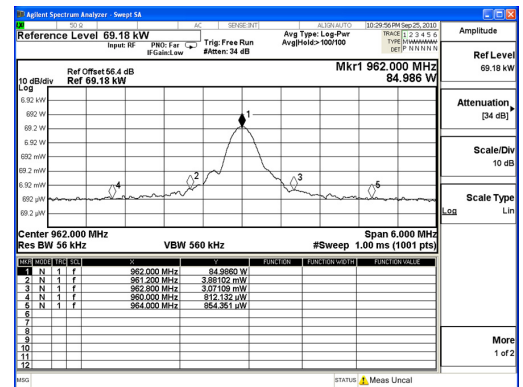
(a) 주파수 안정도 @ 962MHz



(b) RF spectrum @ 962MHz  
그림 6. RF 성능 측정 @ 962MHz



(a) 주파수 안정도 @ 1213 MHz



(b) RF spectrum @ 1213 MHz  
그림 7. RF 성능 측정 @ 1213MHz

뒤쪽 주파수 대역에서는 12kHz 가량의 편차가 발생되었다. 이는 약 0.006 ~ 0.012% 가량의 주파수 편차 즉 주파수 안정도를 보인다. 또한, RF spectrum 특성의 경우 요구사항을 충분히 만족함을 확인할 수 있다. 이는 발란스 구조와 하모닉 트랩, 드라이브단의 비선형성을 이용한 선형성 개선 방법을 통해 F급 전력 증폭기에서 나타나는 비선형성을 일부 개선되었음을 확인할 수 있었다.

그림 8은 pulse shape 특성을 측정한 결과이다. 위의 RF 특성과 마찬가지로 Rise time, Fall time 및 duration의 측정 결과 항행안전시설에서 요구하는 사양에 부합하는 것을 확인할 수 있다.

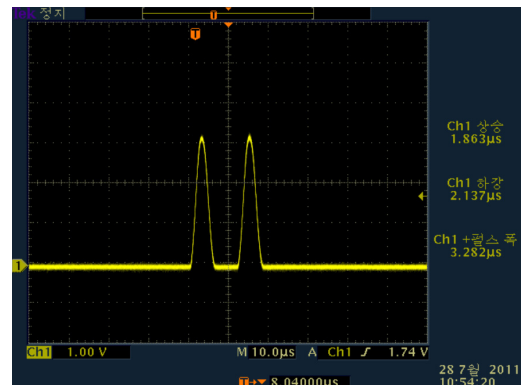


그림 8. Pulse shape

다음 표 2는 구현된 SSPA의 측정결과를 정리한 것이다.

표. 2 SSPA 측정 결과

구 분	측정 결과	충족
Peak Power	1.8kW (62.5dBm)	만족
Frequency	960 ~ 1215 MHz	만족
Stability	최대 0.01%	만족
Efficiency	55%	만족
pulse spectrum	최대 3.4mW @ 0.8MHz	만족
	0.8mW @ 2MHz	만족
Pulse shape	Rise time : 1.863 $\mu$ s	만족
	Fall time : 2.137 $\mu$ s	만족
	Duration : 3.282 $\mu$ s	만족
Pulse type	Gaussian pulse	'만족

#### IV. 결 론

본 연구의 핵심은 높은 선형성을 가지는 고출력 SSPA 구현에 있다. 이에 본 논문에서는 변형된 Class F 기법, Balance 구조, anti-phase 기법 및 harmonic trap 등을 결합하여 항행안전 시설에 적용 가능한 1.5KW급 고출력 SSPA를 구현 및 제작하였다. 구현된 SSPA는 약 300MHz의 대역폭을 가지며, 1.8KW의 출력과 55%의 효율 특성을 보였다. 또한 군과 민간 공항에서 요구하는 주요 신호의 전기적 규격과 시스템 규격을 만족한다. 또한, 본 논문을 통해 확보된 기술력은 다른 대역 및 응용분야의 고출력 pulsed SSPA에 쉽게 적용이 가능할 것으로 사료된다.

본 논문의 결과는 대부분 수입에 의존하고 있는 고출력 pulsed SSPA의 국산화 대체가 가능함을 확인할 수 있었다. 또한 이를 토대로 해외 수입에 의존하고 있는 방송용 시스템, 기상 레이더 및 특수 목적용 고출력 시스템의 핵심 기술력의 확보가 가능할 것으로 예상된다.

#### 참 고 문 헌

[1] 차세대 GaN 고주파 고출력 전력증폭기 기술동향, ETRI, 2014  
 [2] GaAs HBT 고주파 광대역 고출력 전력증폭기 기술 동향, 정진호, 권영우, 2003. 10.  
 [3] Harmonic output matching 을 이용한 고효율 전력 증폭기, 박승원, 2015.  
 [4] LDMOSFET를 이용한 L 대역 고속 펄스 고전력 증폭기 설계. 이희민, 2008.  
 [5] 무선전력 전송을 위한 RF 송신기 기술 동향 및 설계 기법, 강원실, 임종균, 박희수, 구현철, 전자공학회지, 2012  
 [6] Raab. F. H., "Maximum efficiency and output of Class-F power amplifiers," IEEE Trans. MTT, vol. 49, No. 6, 991162-1166, June 2001

[7] Grebennikov, A. V., "Switched-mode tuned high-efficiency power amplifiers: historical aspect and future prospect," IEEE RFIC Symp. pp. 49-52, 2-4 June 2002  
 [8] Ingruber, B., Pritzl, W., Magerl, G., "High efficiency harmonic control amplifier," IEEE MTT-S Int. Microwave Symposium Digest, vol. 2, pp. 859-862, 17-21 June 1996  
 [9] Ji-Hoon Do, Won-Tae Kang, Jeong-Seok Jang and Ui-Seok Hong, " W-CDMA High Power Amplifier using Anti-Phase Intermodulation Distortion Linearization Technology," APMC2007, pp. 1-4, Dec.. 2007.  
 [10] Yuuichi Aoki, "A 20-mA Quiescent Current Two-Stage W-CDMA Power Amplifier Using Anti-Phase Intermodulation Distortion" IEEE Radio Frequency Integrated Circuits Symposium, pp. 357-360, 2004.

#### 저자

이 경 학(Kyounghak Lee)

정회원



- 1992년 2월 : 광운대학교 전자통신공학과 (공학사)
  - 1994년 2월 : 광운대학교 전자통신공학과 (공학석사)
  - 2007년 2월 : 광운대학교 전자통신공학과 (공학박사)
  - 1994년 ~ 2011년 : 한국산업기술평가관리원 책임
  - 2012년 ~ 현재 : 남서울대학교 조교수
- <관심분야> : 무선통신, 신호처리