

## 국지성 호우 관측을 위한 FPGA 기반의 전파강수계 신호처리 설계

최정호<sup>1</sup> · 이배규<sup>2</sup> · 박형삼<sup>3</sup> · 박정민<sup>2</sup> · 임상훈<sup>4\*</sup>

### Design of FPGA-based Signal Processing of EWRG for Localized Heavy Rainfall Observation

Jeong-Ho Choi<sup>1</sup> · Bae-Kyu Lee<sup>2</sup> · Hyeong-Sam Park<sup>3</sup> · Jeong-Min Park<sup>2</sup> · Sang-Hun Lim<sup>4\*</sup>

<sup>1</sup>Adjunct Professor, Department of Automatic System, Chosun College of Science & Technology, Gwangju, 61453 Korea

<sup>2</sup>Assistant Professor, Department of Automatic System, Chosun College of Science & Technology, Gwangju, 61453 Korea

<sup>3</sup>Adjunct Professor, Department of Computer Engineering, Chonnam National University, Gwangju, 61186 Korea

<sup>4\*</sup>Research Fellow, Department of Land, Water and Environment Research, Korea Institute of Civil engineering and Building Technology, Gyeonggi, 10223 Korea

#### 요 약

최근 서울 경기를 비롯한 전국에서 국지성 집중호우, 태풍 등 악천후 관련 자연재해가 증가함에 따라 이에 대한 방재 및 물관리 대책이 필요한 실정이다. 이러한 수재해를 관측하기 위해 사용되는 우량계는 지상의 강우를 연속적·직접적으로 측정할 수 있는 장점이 있는 반면, 우량계 미설치 영역에 대한 공간적인 강우 분포를 정확하게 제공할 수 없다. 이러한 문제를 해결하고자 강수의 공간분포를 측정할 수 있는 전자파 기반 센서인 전파강수계(EWRG, Electromagnetic Wave Rain Gauge)를 개발하였다. 본 논문에서는 전파강수계의 FPGA 기반 신호처리 설계 방법을 제안한다. 전파강수계의 신호처리는 크게 LFM 파형의 ADC 및 DDC와 펄스압축, 상관 계수 및 강수 파라미터 산정으로 설계하였다. 본 연구를 통해 LFM 파형과 펄스압축 신호를 이론적으로 분석하였으며, 전파강수계 신호처리 설계를 위해서 FPGA 기반의 신호처리 설계 및 검증을 수행하였다.

#### ABSTRACT

Recently, the number of natural disasters caused by inclement weather conditions such as localized heavy rainfall, Typhoon, etc. is increasing in Korea, which requires relevant prevention and water management measures. Rain gauges installed on the ground have strengths in continuously-directly measures ground precipitation but cannot provide accurate information on spatial precipitation distribution in the areas without the rain gauges. The present research has designed and developed an electromagnetic-based multi-purpose precipitation gauge(EWRG, Electromagnetic Wave Rain Gauge) that can measure rainfall at the real time, by overcoming spatial representativeness. In this paper, we propose an FPGA-based signal processing design method for EWRG. The signal processing of the EWRG was largely designed by calculating the ADC and DDC of the LFM waveform, pulse compression, correlation coefficient and estimating the precipitation parameter. In this study, the LFM waveform and pulse compressed signal were theoretically analyzed.

**키워드** : 전파강수계, 신호처리, FPGA, 펄스압축, 국지성 호우

**Keywords** : EWRG(Electromagnetic Wave Rain Gauge System), Signal Processing, FPGA, Pulse Compression, Localized Heavy Rainfall

Received 14 August 2020, Revised 17 August 2020, Accepted 20 August 2020

\* Corresponding Author Sang-Hun Lim(E-mail:slim@kict.re.kr, Tel:+82-31-910-0373)

Research Fellow, Department of Land, Water and Environment Research, Korea Institute of Civil engineering and Building Technology, Gyeonggi, 10223 Korea

Open Access <http://doi.org/10.6109/jkiice.2020.24.9.1215>

print ISSN: 2234-4772 online ISSN: 2288-4165

©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.  
Copyright © The Korea Institute of Information and Communication Engineering.

## I. 서론

일반적인 강우 관측에 사용되고 있는 지상우량계는 직경 20 cm의 원통형 우량계이며, 티센법에 의해 면적 우량 산정시 지상우량계가 대표하는 면적은 수 km<sup>2</sup> 내지 수 십 km<sup>2</sup>으로 공간분포에 비해 측정 대표성이 떨어진다는 [1]. 연구 결과에 의하면, 가로, 세로 각 500m의 면적을 9 등분하여 단일 사상에 대해 전도형 지상우량계로 측정 한 결과 4.2~12.4mm의 우량이 측정되어 좁은 면적에서도 큰 편차를 보이며, 이와 관련하여 1960년대부터 강우의 공간적 불균일성에 관한 연구가 몇 차례 수행된 바 있다 [2]. 기존의 기상용 강우 센서는 200km 이상의 원거리 강수 탐지 목적의 고출력 송신을 할 수 있는 펄스 레이더로써, 대부분 중대형의 S 밴드 및 C 밴드 기상레이더를 사용하고 있다[3]. 본 연구는 10km 이내의 근거리 국지성 호우 탐지를 목적으로 기존의 펄스 기상레이더 대신 저전력으로 운용가능하며 분해능이 높은 LFM 방식의 전자파를 적용하였다. 또한 세계 최초로 기존 원통형 지상우량계가 갖는 공간적 대표성 부족 문제를 극복하면서 강우, 강설 및 바람장을 동시에 측정할 수 있는 전자파 기반의 다목적 강수계 신호처리기를 개발하였다. 또한 본 연구를 통해 LFM 방식의 신호를 이론적으로 분석하고, 실제 LFM 파형 구현시 적용 가능한 신호처리 설계 및 모의실험을 수행하여 거리 및 속도를 검출하였다. LFM 파형의 신호처리 시뮬레이션을 수행하기 위해 ADC raw data를 모의하였으며, 이를 DDC 처리한 후 I/Q 데이터를 생성하였다. 또한 이를 펄스 압축한 후 상관관계 및 기상변수를 산출하는 과정의 모의실험을 수행하며 검증하였다.

## II. 적용 기술

### 2.1. 전파강수계 시스템

전파강수계는 기존 강수계의 오염, 시공간적 부정확성 등에 의한 정량적 강우 산정 시 불확실도가 증대함에 따라 기존의 원통형 지상우량계와 같은 관측 성능을 수행하면서 그 한계를 극복할 수 있는 새로운 강수계이다. 또한 정확한 홍수량 산정을 위해 지상강수량의 공간분포를 지형지물의 영향을 받지 않고 측정할 수 있도록 하였으며, 기존 원통형 지상우량계가 갖는 공간적 대표성

부족 문제를 극복하면서 강우, 강설, 바람장을 동시에 측정할 수 있는 전자파 기반의 강수계로 개발하였다[4]. 전파강수계는 직경 50cm의 카본 안테나를 이용하여 K-대역인 24.15GHz의 주파수를 통해 LFM 방식의 전파를 동시에 이중편파로 송수신하여 펄스 압축을 통해 강우, 강설 및 바람장을 동시에 측정할 수 있는 다목적 강수계로서, 송수신기, 안테나장치, 신호처리기로 나뉘어 동작되며, 전파강수계 시스템 구성도 및 주요 사양은 그림. 1과 표 1과 같다.

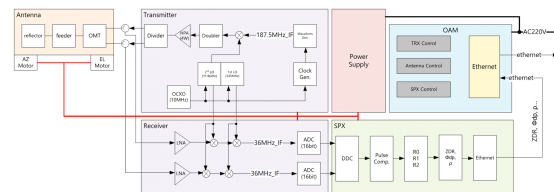


Fig. 1 EWRG system diagram

Table. 1 Specifications of EWRG system

Classification	Development performance
Antenna shape	Parabolic reflector type
Antenna diameter (cm)	50 (carbon)
Polarization	Simultaneous Dual-Pol (horizontal/vertical)
Beam width (deg.)	1.6
Gain (dBi)	40
Driving range (deg.)	Azimuth:0~360, Altitude:-2~+92
Driving speed (RPM)	6 (azimuth), 4 (altitude)
Operating frequency (GHz)	24.15
Transmission power (W)	4 (Horizontal/ Vertical)
Signal form	I/Q demodulation
Effective observation range (m)	150 ~ 10 Km
Waveform	LFM Pulse
Pulse width (μs)	1
PRF (Hz)	10K
Distance resolution (m)	30
ADC resolution (bit)	14

### 2.2. LFM 및 펄스압축

전파강수계는 LFM(Linear Frequency Modulation, 선형 주파수 변조) 파형을 사용하며, 이 파형은 시간에 따라 주파수가 선형적으로 변조되는 파형으로 펄스 압

축과 고해상도 거리 추출(High Range Resolution) 용도로 널리 이용된다. 또한 LFM 신호를 이용한 펄스 압축 기법에 사용될 수 있다. 펄스 압축 기법은 LFM 신호를 적당한 크기의 전력과 긴 펄스폭으로 송신하여 먼 탐지 거리를 확보하고, 표적으로부터 반사되는 수신 신호의 펄스폭을 압축하여 높은 거리 해상도와 신호 대 잡음비를 향상시키는 기법이다. 송신 신호의 LFM은 시간에 따라 선형적으로 증가 또는 감소하는 삼각파 형태이거나 선형적으로 증가 후 기본 주파수로 돌아오는 톱니파 형태를 이용한다. 송신 신호와 목표물로부터 반사되어 되 돌아온 수신 신호의 시간차는 거리에 따라 변화하며 획득된 거리 정보를 CPI(Coherent Pulse Interval) 시간동안 축적하여 FFT(Fast Fourier Transform) 처리를 수행함으로써 속도 정보를 추출해 낼 수 있다. 그림 2에서 빨간선은 선형 주파수 변조된 송신 신호이며, 노란선과 파란선은 두 표적으로부터 반사되어 돌아온 수신 신호이다.  $\Delta t$ 는 송수신간의 시간차이며 이는 표적과 전파강수계 사이의 거리이다.

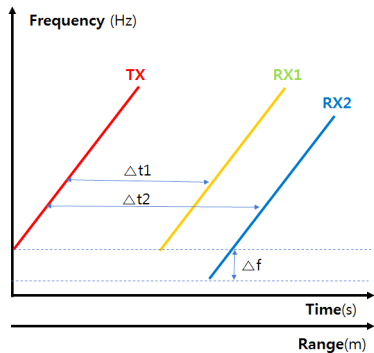


Fig. 2 LFM transmitting and receiving concept

$\Delta t$ 는 송수신 신호간의 주파수 차이이고 이는 곧 도플러 주파수 그리고 표적 기준 상대적 속도를 의미한다. LFM 신호를 생성하기 위해서 신호의 위상을 변화시키는 수식을 이용하여 구현하였다. 식 (1)과 같이 LFM 신호의  $\theta(t)$ 를 정의하고, 시간 변수  $t$ 를 루프의 반복 횟수( $i$ )와 시간 간격( $\Delta t$ )의 곱으로 변환하여 식 (2)와 같이 나타낼 수 있다. 여기서  $f_c$  중심주파수,  $f_{start}$  변조가 시작되는 주파수,  $f_{stop}$  변조가 멈추는 주파수,  $T$  주기를 의미한다[5].

$$\theta(t) = 2\pi \left( f_c t + \frac{f_{start} - f_{stop}}{2T} t^2 \right) \quad (1)$$

$$\theta(t) = 2\pi \left( f_c (i * \Delta t) + \frac{f_{start} - f_{stop}}{2(\text{sample No.} * \Delta t)} (i * \Delta t)^2 \right) \quad (2)$$

전파강수계 시스템에서 짧은 펄스폭과 큰 최대전력을 지닌 파형을 전송하려면 수신단에서는 높은 거리 분해능과 양호한 검파성능을 갖는다. 펄스압축이란 이러한 파형 대신에 긴 펄스폭과 적은 최대 전력을 지닌 파형을 전송하여도 동일한 거리 분해능과 검파성능을 얻게 하는 전파강수계 방식을 말한다. 펄스 압축 전파강수계는 긴 펄스를 송신하기 때문에 평균전력을 효과적으로 사용할 수 있고 또 송신기에서 높은 첨두전력을 만들 필요가 없으며, 펄스 반복주파수(PRF : Pulse Repetition Frequency)를 높이거나 전파강수계의 탐지거리를 감소시키는 일이 없이 평균전력을 높일 수 있다. 펄스 압축을 사용하는 전파강수계는 긴 펄스를 사용함으로써 도플러(doppler) 분해능도 높일 수 있을 뿐만 아니라 코딩 신호를 사용함으로써 간섭신호에 대한 취약성도 줄일 수 있다. 따라서 펄스 압축 시스템은 전송파형의 대역폭을 증가시키기 위하여 파형을 변조하고, 수신된 파형을 압축하는 시스템이다[6].

그림 3는 송신신호의 펄스 압축정도를 보여주고 있다. 이 신호의 펄스 압축비(Pulse compression ratio)는 식 (3)과 같이 정의된다.

$$\frac{\tau}{\tau_{comp}} = \frac{\Delta F}{\Delta f} \quad (3)$$

여기서  $\tau$ 는 펄스폭(s),  $\tau_{comp}$ 는 펄스 압축된 펄스폭,  $\Delta F$ 는 송신 신호의 대역폭(Band width),  $\Delta f$ 는 주파수분해능을 나타낸다.

$\tau_{comp}$ 와  $\Delta F$  그리고  $\Delta F$ 와  $\tau$ 는 식 (4), 식 (5)와 같은 관계에 있다.

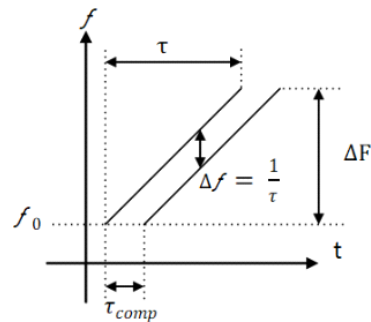


Fig. 3 Pulse compression ratio

$$\tau_{comp} = \frac{1}{\Delta F} \quad (4)$$

$$\Delta F = \frac{1}{\tau} \quad (5)$$

주파수 분해능( $\Delta f$ )은 두 목표물을 구별할 수 있는 최소한의 값이며, 거리분해능만큼 떨어진 두 목표물의 주파수 간격을 나타낸 것이므로 식 (6)과 같이 계산된다.

$$\begin{aligned} \Delta f &= f_2 - f_1 \\ &= \frac{2B}{c\tau}(R_2 - R_1) = \frac{2B}{c\tau}\Delta r \end{aligned} \quad (6)$$

거리분해능( $\Delta r$ )은 2개 이상의 근접한 표적을 구분하는 표적간의 거리를 나타낸다. 거리분해능은 식 (7)로 정의할 수 있으며,  $B$ 는 전송펄스의 주파수 대역폭(Band Width, Hz)이다.

$$\Delta r = \frac{c\tau}{2} = \frac{c}{2B} \quad (7)$$

식 (7)의 거리분해능( $\Delta r$ )을 식 (6)에 대입하여 주파수 분해능( $\Delta f$ )을 구한다. 다시  $\Delta f$ 는 식 (8)과 같이 계산된다.

$$\Delta f = \frac{2B}{c\tau} \frac{c}{2B} = \frac{1}{\tau} \quad (8)$$

주파수 분해능은 펄스폭에 따라 결정되어지며, FFT를 사용하는 경우 성능에 영향을 끼친다. 또한 거리 분해능은 펄스 폭이 짧을수록 증가하며 높은 탐지확률 및 신호대잡음비(SNR)는 펄스 폭이 클수록 증가한다. 따라서 그러므로 탐지능력(SNR)을 유지하면서 거리 분해능을 향상시키기 위해서 펄스 압축을 수행한다.

### III. 전파강수계 신호처리 설계

#### 3.1. FPGA 기반의 신호처리 설계

전파강수계의 신호처리는 안테나장치와 송수신장치에서 관측한 기상 신호를 디지털 신호로 변환하고 신호처리를 수행하여 주변의 강수량 등을 산출하는 역할을 한다. 표 2와 같이 신호처리기에서는 송수신장치로부터 수신한 H채널과 V채널의 IF 신호를 ADC (Analog to Digital Converter)에서 샘플링하여 디지털 신호로 변환하고 DDC(Digital Down Converter)와 펄스압축을 거쳐

I/Q 데이터로 변환한다. I/Q 데이터로부터 상관계수와 기상변수를 계산하여 최종 산출물을 이더넷을 통하여 운영제어장치로 전달한다.

Table. 2 Specification of EWRG Signal Processor

Classification	Specifications
Detection range and Resolution	Detection range above 3km Resolution below 30m
Correlation coefficient calculation	R0, R1, R2 calculation(PRF=10KHz)
Meteorological variables	Single polarization meteorological variable: Zh, Zv, Vh, Vv, Wh, Wv Dual polarization weather variable: ZDR, ρHV, ΦDP Quality variable: SQIh, SQIv, SNRh, SNRv

신호처리는 그림 4와 같이 송수신장치의 H채널과 V채널의 IF 신호를 입력받아 14bit ADC를 통하여 데이터를 추출하며, 신호처리를 수행한 산출물 및 정보를 기가비트 이더넷 통신 및 RS-422 통신을 통하여 운영제어 장치에 전송 및 응답하는 역할을 수행한다.

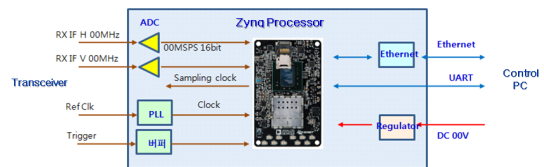


Fig. 4 Signal processor circuit card assembly composition

#### 3.2. ZYNQ 프로세서 설계

신호처리기의 메인 프로세서인 ZYNQ 디바이스에서는 그림 5와 같이 ADC 데이터로부터 DDC-펄스압축-상관계수 계산 기능을 수행하고 그 결과를 DMA (Direct memory access)를 통하여 PS(Processing system) 부분으로 전달한다[7].

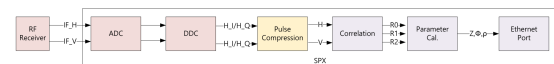


Fig. 5 Signal processing function flowchart

ADC 샘플링과 DDC, 펄스압축 기능은 그림 6과 같이 외부 트리거에 동기를 맞춰 매 주기 100us(1/ 10kHz PRF) 단위로 처리를 수행한다. 상관계수 계산은 펄스압축 된 128주기(=12.8ms)의 데이터를 모아서 처리하고

그 결과를 전송한다. ADC 샘플링은 H채널, V채널 각각에 대하여 36MHz의 IF 입력에 대하여 16bit 48MSPS로 수행한다. 1주기 100us 중 실제 데이터 획득은 68us 동안 수행하므로 매 주기마다  $68\mu s \times 48\text{MSPS} = 3264$ 개의 샘플이 획득된다.

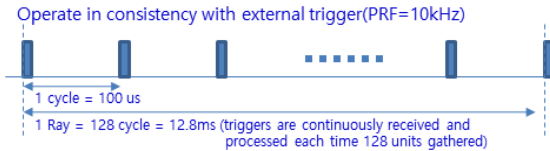


Fig. 6 Operating concept of PL part by triggers

DDC는 그림 7과 같이 ADC 샘플링 된 3264 샘플 데이터에서부터 1,5,9,13,... 샘플 순으로 데이터를 취하여 I 데이터를 생성하고, 2,6,10,14,... 샘플 순으로 데이터를 취하여 Q 데이터를 생성한다. 따라서 I/Q 각각  $3264/4 = 816$ 개의 12MSPS 데이터가 생성된다. DDC 역시 H채널, V채널 각각에 대하여 수행한다(Fig. 6).

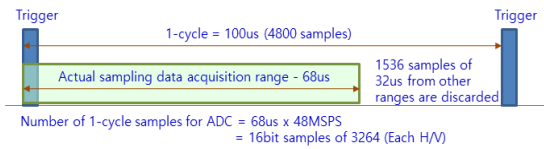


Fig. 7 ADC and DDC concept

DDC 된 I/Q 데이터에 대하여 펄스압축 과정은 그림 8과 같이 수행한다. 펄스압축 과정에서는 FFT/IFFT를 수행하므로 816개의 샘플 데이터에 zero-padding을 수행하여 2N인 1024개의 데이터로 처리한다. 펄스압축에 사용되는 replica 데이터는 미리 생성하여 레지스터에 저장하여 사용한다. 펄스압축 결과의 부엽을 줄이기 위하여 윈도우를 곱하는 경우가 있는데 윈도우를 사용하는 경우와 사용하지 않는 경우의 replica를 생성하고 저장하여 사용한다. DDC 된 I/Q 수신 데이터에 대하여 1024 포인트 FFT를 수행한 후 레플리카를 곱하고 다시 1024 포인트 IFFT를 수행하면 펄스압축이 완료된다. 1024 데이터 중

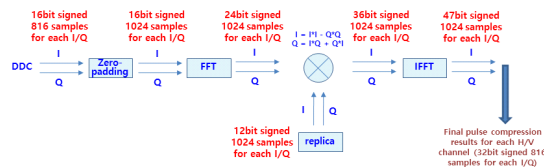


Fig. 8 Pulse compression process

816개 샘플 이후는 의미 없는 결과이므로 최종적으로 32bit 816개 샘플의 펄스압축 결과가 생성된다.

주기 단위로 펄스압축이 수행되면 이를 128 주기의 결과를 모아서 상관계수를 계산한다. 그림 9와 같이 H, V 채널 각각에 대하여 단일편파 상관계수는 R0, R1, R2가 있으며, H, V 채널 데이터를 같이 사용하는 교차상관계수는  $\rho_{HV}(0)$ 가 있다. 상관계수 계산에서는 816개의 각 샘플에 대하여 128개의 주기 데이터 방향으로 처리를 한다. R0, R1, R2는 V 채널에 대해서도 동일하게 계산하며, R0는 실수만 생성되지만 R1, R2,  $\rho_{HV}(0)$ 는 I/Q 모두 계산을 한다. H, V 편파별 상관계수 R0, R1, R2로부터 편파별 Z, V, W와 이중편파 기상변수 ZDR을 계산하고 교차상관계수  $\rho_{HV}(0)$ 로부터 이중편파 기상변수  $\rho_{HV}$ ,  $\Phi_{DP}$ 를 계산하며, 또한 품질관리를 위한 SNR, SQI 등도 계산한다[8]. 최종 계산된 기상변수는 이더넷을 통하여 외부로 전달한다.

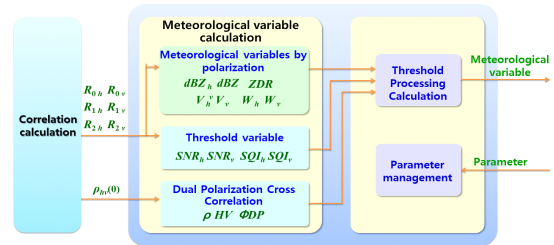


Fig. 9 Meteorological Variable calculation module structure

기상 변수를 산출하기 위해서는 그림 9와 같이 상관계수 모듈에서 계산된 상관계수로부터 기상변수를 산출하는 계산을 처리한다. 먼저 선택 사항으로 거리 평균을 수행한 후 임계변수와 기상변수를 계산한다. 여기서 기상 변수는 단일편파 변수인 Z, V, W 외에 이중편파 변수인 ZDR, LDR,  $\rho_{HV}$ ,  $\Phi_{DP}$ , KDP를 산출한다. Z, V, W는 H편파와 V편파 각각에 대하여 산출한다. 산출된 기상변수는 최종적으로 임계처리와 스펙클 제거 과정을 거친 후 운영제어 서버로 전달된다.

#### IV. 전파강수계 신호처리 검증

ZYNQ 프로세서의 신호처리 로직 및 소프트웨어 기능을 검증하기 위하여 PC 기반의 MATLAB에서 ADC raw data에 해당하는 가상 데이터를 생성하고 이로부터

신호처리를 수행하여 로직 및 소프트웨어 동작 기능을 확인하였다.

#### 4.1. ADC raw data 모의

그림 10과 같이 ADC raw data를 모의하였다. 한 주기에 대하여 48MSPS로 샘플링 한 3264개의 샘플 중 240번째 샘플과 360번째 샘플 위치에 표적에 의한 LFM 반사 신호가 존재하는 경우이다. 240번째 샘플은  $240/48\text{MSPS} = 5\mu\text{s}$ 의 시간 지연에 해당하고 이는 750m의 거리에 표적이 있는 경우이다. 360번째 샘플은  $7.5\mu\text{s}$ 의 시간 지연이며 이는 1125m의 거리에 해당한다. LFM의 펄스폭이  $1\mu\text{s}$ 이므로  $1\mu\text{s} \times 48\text{MSPS} = 48$  이므로 각각의 표적 위치에 48개의 샘플링 된 수신 데이터가 존재하는 것을 볼 수 있다.

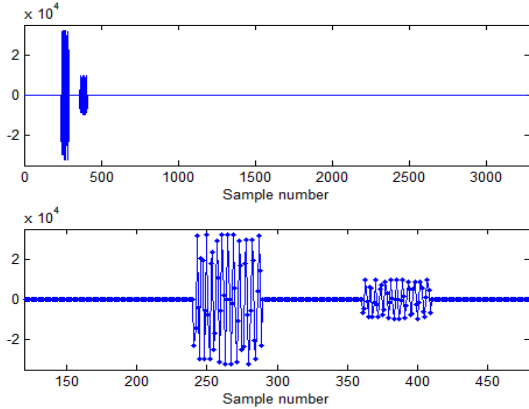


Fig. 10 ADC raw data created by simulation

그림 11은 ADC 원시 자료(raw data)로부터 DDC 처리를 수행한 I/Q 데이터를 보인다. 왼쪽 그림은 I 데이터이고, 오른쪽 그림은 Q 데이터이다. DDC를 수행하면서 데이터양이 48MSPS에서 12MSPS로 1/4로 줄어들기 때문에 데이터의 샘플 위치가 각각 60번째와 90번째로 1/4로 앞당겨진 것을 볼 수 있다.

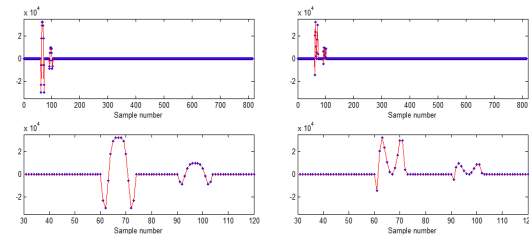


Fig. 11 DDC-processed I/Q data

#### 4.2. DDC 방법 검증

본 연구에서 사용한 DDC 방법을 검증하기 위하여 일반적인 DDC 방법을 적용하였다. 일반적으로 DDC는 ADC 샘플링된 신호에  $\cos(2\pi f_0 n)$ 과  $\sin(2\pi f_0 n)$ 을 곱하고 lowpass filtering을 통하여 고주파 성분은 제거하고 저주파 성분만 남긴 후에 기저대역의 샘플 개수에 해당하도록 decimation을 취하게 된다. 본 연구에서의 IF 신호는 36MHz이고 이를 기저대역으로 하향변환 하는 것이므로  $f_0$ 는 36MHz가 된다.

그림 12는 ADC 데이터에  $\cos(2\pi f_0 n)$ 과  $\sin(2\pi f_0 n)$ 을 곱한 결과이다. 그림에서 신호의 전체 윤곽은 저주파 성분에 해당하고 사인파와 같은 모양은 고주파 성분에 해당한다. 고주파 성분을 제거하고 1/4 데시메이션(decimation)을 수행하여 12MSPS로 맞추면 I/Q 신호가 생성된다. 본 방법은 ADC 표본화율(sample rate)이 DDC 후 기저대역 데이터 표본화율의 4배가 되고, IF 입력 중심주파수가 기저대역 표본화율의 3배가 되는 특수한 경우에 간단히 적용되는 방법이다.

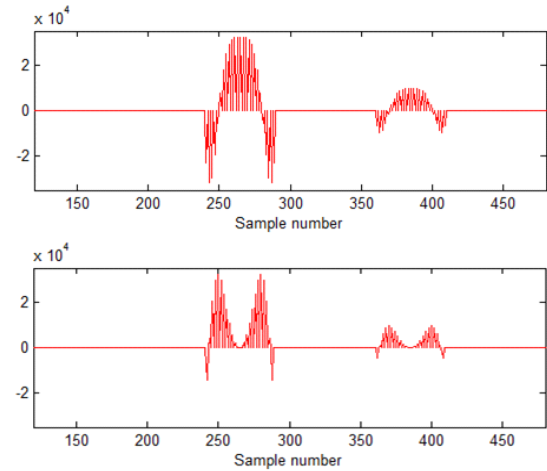


Fig. 12 Result of multiplying ADC data with cosine and sine

#### 4.3. 펄스 압축 검증

그림 13과 같이 DDC된 I/Q 데이터를 사용하여 펄스 압축을 수행한 후 절대값을 구하고 정규화하여(normalize) 상대 크기를 나타냈다. 아래 그림은 실수 형태이고 오른쪽 그림은 dB 형태이다. 샘플 위치 60번째와 90번째에 압축된 표적 신호가 존재하는 것을 볼 수 있다. 펄스폭  $1\mu\text{s}$ , 대역폭 5MHz의 LFM 신호를 펄스압축하면 3dB 거리 분해능이 30m(200ns)가 된다. 200ns의 길이는 약 2.5

개의 샘플이 되며 그림에서 3dB 분해능에 해당하는 것을 볼 수 있다.

아래의 결과처럼 펄스압축을 수행하면 약 -13dB 정도의 부엽이 크게 발생하게 된다. 부엽을 줄이기 위하여 펄스압축 과정에서 FFT 전에 윈도우를 사용하게 된다.

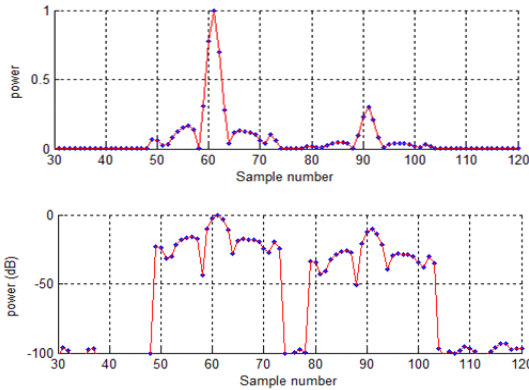


Fig. 13 Relative size of pulse compression results (no window)

그림 14는 동일한 ADC 데이터에 대하여 Blackman 윈도우를 사용한 펄스압축 결과이다. 그림에서 보듯이 부엽은 크게 줄었으나 대신 3dB 분해능이 다소 저하되는 것을 볼 수 있다.

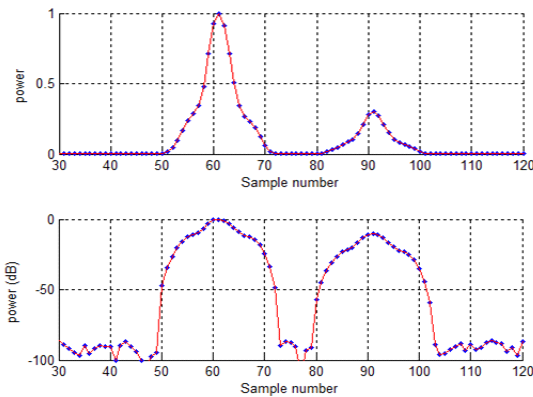


Fig. 14 Relative size of pulse compression results (Blackman window)

#### 4.4. 상관계수 및 기상 변수 생성

그림 15는 모의 신호 데이터를 사용하여 128개 주기에 대한 결과를 모아서 상관계수와 기상변수를 생성한 결과이다. 모의 신호는 실제 강수의 기본적인 파라미터

를 정의하여 생성한다. 그림 15와 같이 신호처리 결과를 전시하였으며, 안테나가 지향하는 각도의 거리에 대하여 R0, Z, V 등의 값을 표시하였다.

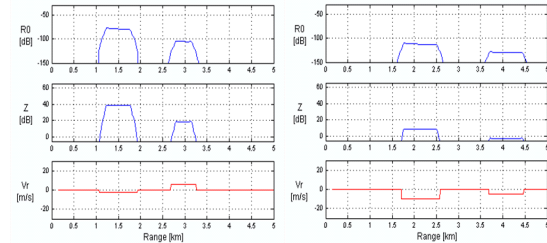


Fig. 15 Example of correlation coefficients and meteorological variables calculation

그림 16과 같이 전파강수계의 신호 검증을 위해 한국 건설기술연구원 SOC 센터의 지상우량계와의 비교 검증을 실시했다. 전파강수계의 신호 중 반사도(Z)와 차등 반사도(ZDR), 비차등위상차(KDP)를 강우량으로 환산하여 표 3과 같이 지상우량계와 비교하였으며, 그림 16에 표시된 지상우량계 중 정상적으로 강우량을 수집한 녹색의 우량계를 대상으로 비교하였다.

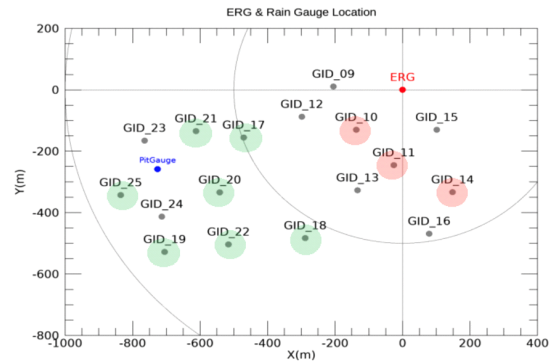


Fig. 16 Schematic diagram of rain gauge(KICT)

Table. 3 Difference verification of EWRG and Rain Gauge of the experiments in the Fig. 16.

Name	EWRG (mm)	Gauge	Diff.	Diff(%)
GID_17	82.0	84.1	-2.1	-2.5
GID_18	80.8	84.7	-3.9	-4.6
GID_19	83.1	83.7	-0.6	-0.7
GID_20	79.1	87.2	-8.1	-9.3
GID_21	77.2	83.2	-6.0	-7.2

Name	EWRG (mm)	Gauge	Diff.	Diff(%)
GID_22	79.8	79.2	+0.6	+0.8
GID_25	91.5	88.7	+2.8	+3.2
AVG	81.9±4.6	84.4±3.0	-2.5	-2.9

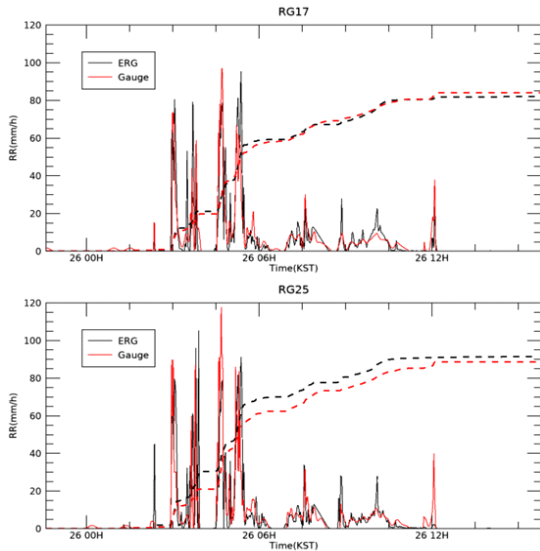


Fig. 17 Distribution of precipitation for the EWRG and Rain Gauge

그림 17과 같이 7개의 지상우량계와 전파강수계의 시계열 및 누적강우량을 각각 비교 검증하였다. 전파강수계의 신호 검증 결과에 대한 지상 우량계와의 평가 결과는 정확도에서 0.7%~9.3%의 우수한 값을 보여 주고 있다. 이러한 결과로부터 전파강수계가 기존의 주요 지점 중심 우량계 등의 의존에서 벗어나 보다 효과적인 관측 방법이 될 수 있을 것으로 여겨진다.

## V. 결 론

본 연구를 통해 국내·외 최초로 기존 원통형 지상우량계가 갖는 공간적 대표성 부족 문제를 극복하면서 강우, 강설 및 바람장을 동시에 측정할 수 있는 전자파 기반의 다목적 강수계를 개발하였다. 이는 지상 부근의 저고도에서 강수의 공간적 분포를 측정하기 위한 신개념의 강우량, 강설, 바람장 측정 장비로서 네트워크 기반

의 전파강수계를 개발하였다. 전파강수계 신호처리는 LFM 방식의 전파를 동시 이중편파로 송수신하여 펄스 압축을 통해 강우, 강설 및 바람장을 동시에 측정할 수 있으며, 실제 LFM 레이더 구현시 적용 가능한 신호처리 설계 및 모의실험을 수행하여 거리 및 속도를 검출하였다. 또한 LFM 레이더의 신호처리 시뮬레이션을 수행하기 위해 ADC raw data를 모의하였으며, 이를 DDC 처리한 후 I/Q 데이터를 생성하였다. 또한 이를 펄스 압축 후 상관관계 및 기상변수를 산출하는 과정의 모의 실험을 수행하였다. 이러한 기술을 바탕으로 향후 이중편파 관측 변수들에 대한 신호처리 검증 및 개선과 강수량 추정 모델 개발에 대한 연구를 집중할 계획이다.

## ACKNOWLEDGEMENT

This study was conducted with financial support from the Ministry of SMEs and Startups (Package support business for the high-tech ventures in the early stage of growth in 2020(10296136))

## REFERENCES

- [ 1 ] KICT(Korea Institute of Civil Engineering and Building Technology), "Development of Ultra-small Radar Rain Gauge and Rainfall Analysis Technology," *Research Report, Ministry of Land, Infrastructure, and Transport*, 2014.
- [ 2 ] J. Sandsborg, "Local Rainfall Variations Over Small, Flat, Cultivated Areas," *Tellus*, vol. 21, no. 5, pp. 673-684, 1969. DOI: 10.1111/j.2153-3490.1969.tb00475.x.
- [ 3 ] T. Soren, "Weather Radar Rainfall Data in Urban Hydrology," *Hydrology and Earth System Sciences*, vol. 21, pp. 1359-1380, 2017. DOI: 10.5194/hess-21-1359-2017.
- [ 4 ] B. J. Jang, W. Kim, S. H. Lim and J. H. Choi, "Analysis of Rainfall Cases and Their Observed Signal from Prototype of Electromagnetic Wave Rain Gauge," *The Institute of Electronics and Information Engineers Conference*, 2018.
- [ 5 ] J. H. Yoon, S. O. Yoo, D. J. Lee and S. H. Ye, "LFM Radar Implemented in SDR Architecture," *The Journal of Korean Institute of Electromagnetic Engineering and Science*, vol. 29, no. 4, pp. 308 - 315, 2018. DOI: 10.5515/KJKIEES.2018.29.4.308.
- [ 6 ] H. Chen, "High-quality Pulse Compression of Pre-chirped



Pulses in Fiber Amplifiers,” *CLEO: Science and Innovations*, 2012.

- [ 7 ] C. H. Ha, B. J. Kwon and M. G. Lee, “Radar Signal Processor Design Using FPGA,” *Journal of the Korea Institute of Military Science and Technology*, vol. 20, no. 4, pp. 482-490, 2017. DOI: 10.9766/KIMST.2017.20.4.482.
- [ 8 ] J. H. Choi, C. S. Yoo, S. H. Lim, M. S. Han and B. K. Lee, “Quality Control Algorithm of Rainfall Radar Image for Uncertainty of Rainfall,” *Journal of Korea Multimedia Society*, vol. 20, no. 12, pp. 1874-1889, 2017. DOI: 10.9717/kmms.2017.20.12.1874.



**최정호(Jeong-Ho Choi)**

고려대학교 사회환경시스템공학과 공학박사  
광주과학기술연구원(GIST) 기전공학 Post-Doc  
조선이공대학교 자동화시스템과 겸임교수  
※관심분야: 레이더 시스템 및 신호처리



**임상훈(Sang-Hun Lim)**

콜로라도주립대 전자컴퓨터공학과 공학박사  
한국건설기술연구원 국토보전본부 연구위원  
※관심분야: 레이더 시스템 및 신호처리



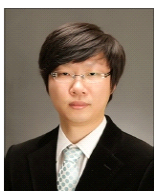
**이배규(Bae-Kyu Lee)**

조선대학교 전자공학과 공학박사  
조선이공대학교 자동화시스템과 조교수  
※관심분야: 임베디드 시스템 및 원격 제어



**박형삼(Hyeong-Sam Park)**

전남대학교 컴퓨터공학과 박사수료  
전남대학교 컴퓨터공학과 연구원  
※관심분야: IOT 시스템 및 인공지능



**박정민(Jeong-Min Park)**

조선대학교 전기공학과 공학박사  
조선이공대학교 자동화시스템과 조교수  
※관심분야: PLC 및 자동화공정제어