

단상/삼상 계통 전력 품질 평가를 위한 고조파 분석 알고리즘 개발

임종수¹, 이택기[†]

The Algorithm Development on Harmonic Analysis for Estimating the Quality of 1-Phase/3-Phase Power System

Jong-Su Lim¹ and Taeck-Kie Lee[†]

Abstract

With the development of technology, a new class of smaller and more sensitive electrical systems have emerged, requiring higher quality power system. Improving the quality of the power system requires removing harmonics as much as possible to ensure better efficiency. We should first collect information on what harmonic frequencies are included in the current power system to remove the harmonics. In this paper, a new frequency analysis algorithm is introduced for a three-phase and a 1-phase power system. MTE PRS 600.3 is used to generate any harmonics to ensure that the algorithm performs well. Typing any harmonics on the Windows GUI program shows the analyzed result from the board developed for the algorithm.

Key words: THD(Total Harmonic Distortion), FFT(Fast Fourier Transform), Z-Transform, Mason's rule, Goertzel algorithm

1. 서 론

단상뿐만 아니라 3상 계통을 통하여 공급되는 전력에 대한 품질은 여러 방법으로 평가하게 된다. 특별히, 전력을 소비하는 사용자 제품이 안정적으로 동작하기 위해서는 공급되는 전력의 기본 주파수 이외에 포함될 수 있는 고조파 성분들에 대한 분포와 크기를 확인하는 것은 중요하다. 그러므로, 보다 높은 품질의 전원을 요구하는 장비를 사용하는 경우에는 계통의 전원을 변환하여 사용하게 된다. 이때, 변환한 전원이 목표로 하는 품질에 도달하였는지 평가하기 위해서는 실시간성을 가지며, 정밀한 주파수 분석, 위상, 유효, 무효, 피상 전력, 역률 등과 같은 효율에 대한 평가가 가능한 알고리즘이 필요하게 된다.

산업 기술의 발전은 전자 제품의 소형화와 정밀화를

가속화시키고 있다. 예를 들면, 통신용 기지국 장비의 경우, 계속해서 소형화와 다양한 통신 방식을 집적화하기 위한 많은 기술들이 사용되고 있다. 그런데, 이들 대부분의 통신 방식은 위상의 동기화를 기본으로 사용하고 있다. 그러므로, 통신 장비에 전력을 공급하는 컨버터에 고조파 성분들이 많으면 통신 장비 본연의 역할을 보장할 수 없게 된다. 이처럼 기술의 발전은 보다 높은 품질의 전력 공급을 보장받기 원하며, 이것은 결국, 공급되는 전력에 가능하면 기본파를 제외한 나머지 고조파 발생을 억제해야 한다는 것을 의미하게 된다. 또한, 이것은 전력의 효율과도 밀접한 관련을 가지고 있다.

일반적으로 교류 전원의 경우, 홀수 고조파 성분만 평가 항목으로 사용하는 경우가 많은데, 다양한 원인에 의해서 사용자에게 공급되는 전원에 짝수 고조파 성분들도 포함될 수 있다. 그러므로, 홀수뿐만 아니라 짝수 고조파 성분도 정확하게 분석할 수 있어야 하며, 무엇보다도 실시간으로 전력에 대한 품질을 계속해서 검출할 수 있도록 빠른 계산 속도를 보장할 수 있어야 한다^{[1],[2]}.

본 논문에서는 입력되는 단상 또는 3상 계통에 포함될 수 있는 여러 고조파들을 실시간적으로 정확하게 분석할 수 있는 알고리즘을 제안한다^{[3],[4]}.

개발한 알고리즘에 대한 검증 작업을 수행하기 위해

Paper number: TKPE-2023-28-1-3

Print ISSN: 1229-2214 Online ISSN: 2288-6281

[†] Corresponding author: tklee@hknu.ac.kr, School. Dept. of Electronic and Electrical Eng., Hankyong Nat'l University, Tel: +82-31-670-5600 Fax: +82-31-670-5609

¹ Power Research Lab. SuJin.

Manuscript received Sep. 26, 2022; revised Oct. 18, 2022; accepted Oct. 24, 2022

서 전문 수치해석 시뮬레이션 소프트웨어인 MATLAB을 활용하였고, 단상 또는 3상 계통의 전원에서 사용할 수 있는 전력 측정용 보드를 개발하였다. 또한, 개발한 보드를 고가의 정밀한 MTE(Meter Test Equipment) PRS 600.3 장비에 연결하였고, MTE에서 설정한 다양한 형태를 갖는 고조파를 단상과 3상 계통 전원에서 측정하였다. 3상의 경우, 필요한 A상, B상, 그리고, C상 전압 3개와 그에 따른 전류 3개에 포함되어 있는 각각의 고조파들을 50차까지 분석할 수 있도록 전력 측정용 보드를 개발하였고, 그 결과를 컴퓨터에서 쉽게 확인할 수 있도록 윈도우즈 응용 프로그램도 함께 개발하였다. 그러므로, 기존에 고조파 분석 기능을 지원하는 고가의 전용 반도체 소자를 사용할 필요 없이 소프트웨어적으로 구현하여 사용할 수 있으므로 제품의 단가를 낮추는 효과를 기대할 수 있다.

MTE 장비에서 임의로 고조파를 추가한 3상 전압 또는 전류를 본 논문에서 개발한 고조파 분석 알고리즘을 수행하는 전력 측정용 보드에 입력하여 분석한 결과 값과 MTE 장비에서 추가한 고조파 정보를 비교하여 개발한 알고리즘의 정당성을 실험을 통하여 입증하였다.

2. 고조파 분석 알고리즘

입력 신호에 대한 전대역 주파수가 아닌 원하는 특정 주파수만 검출하고 싶다면, Goertzel 알고리즘^{[7],[8],[9]}이 FFT(Fast Fourier Transform) 보다 계산량이 적어서 훨씬 빠르다. Goertzel 알고리즘은 FFT가 아닌 DFT에 대한 일종의 수정 알고리즘이다. 길이 N의 finite-length sequence에 대한 DFT(Discrete Fourier Transform)는 다음과 같이 주어진다.

$$X[k] = \sum_{n=0}^{N-1} x[n] W_N^{kn}, \quad (1)$$

($k = 0, 1, \dots, N-1$)

여기서, $W_N = e^{-j(2\pi/N)}$ 이며, k 는 주파수 영역에서 특정 주파수를 의미한다. 그리고, 그 값은 N-1까지 커질 수 있다. 왜냐하면, $k = N$ 이면, $W_N^k = e^{-j(2\pi k/N)}$ 에서 $W_N^N = e^{-j(2\pi N/N)} = 1$ 이 되기 때문이다. 즉, 0-(N-1)번)까지 주기성을 가지며, $k = N = f_s$ 가 된다. 즉, $k = N$ 일 때가 샘플링 주파수가 되며, 다음과 같은 상관관계가 성립한다.

$$\frac{f_s}{N} = \frac{f}{k} \quad (2)$$

즉, 샘플링 주파수가 전체 입력 데이터의 개수 N 에 해당한다면, 특정 주파수 f 는 k 에 해당하게 된다. 이런

관계가 의미를 가지기 위해서는 Nyquist rule에 근거하여 적어도 한 주기의 2배에 해당하는 샘플들을 N 으로 설정하던지, 아니면, 정확히 한 주기를 표현할 수 있는 샘플들을 포함하는 데이터를 입력으로 제공하는 N 으로 설정해 주어야 한다. 이것은 zero crossing 입력 데이터를 근거로 한 것이다. 그러나, 입력 신호에 잡음 또는 고조파가 많은 경우에 zero crossing을 근거로 한 주기를 정확히 추출하는 것은 신뢰도가 떨어진다. 이때에는 기본파의 한 주기를 구성하는 샘플들의 2배, 예를 들면, 60 [Hz] 기본파의 경우에는 1주기가 대략 134 샘플들이므로 $N = 2 \times 134 = 268$ 샘플들을 포함하는 배열을 고조파 분석을 위한 입력으로 제공해 주면 된다. 본 논문에서는 3개의 파형들을 저장할 수 있는 버퍼 즉, $256 \times 3 = 768$, $N = 768$ 샘플들을 포함하는 배열을 고조파 분석을 위한 입력으로 사용하고 있다. 768 샘플들 안에 적어도 5개의 주기에 해당하는 샘플들을 포함하고 있으므로 고조파 분석을 하기에는 충분하다. 이제 식 (2)는 다음과 같이 정리할 수 있다.

$$k = \frac{(N \times f)}{f_s} \quad (3)$$

그리고, inverse discrete Fourier transform은 다음과 같이 주어진다.

$$x[n] = \frac{1}{N} \sum_{k=0}^{N-1} X[k] W_N^{-kn}, \quad (4)$$

($n = 0, 1, \dots, N-1$)

식 (1)과 식 (4)에서 $x[n]$ 과 $X[k]$ 양쪽은 모두 복소수이다. 또한, 식 (1)과 식 (4)는 단지, W_N 의 지수부에 부호와 스케일 팩터(Scale Factor) $1/N$ 만 다르다. 그러므로, 식 (1)을 위한 계산 과정은 식 (4)에 대한 계산과정에 직접 적용할 수 있다. 그러므로, k 가 N개인 경우에 총 N^2 개의 복소수 곱셈들과 $N(N-1)$ 개의 복소수 덧셈들이 DFT를 계산하는 데 요구된다. 결국, N이 커지면 곱셈과 덧셈 연산이 급격하게 증가하게 되는 것을 알 수 있다. 대부분의 DFT 계산의 효율성 증대를 위한 알고리즘은 W_N^{kn} 의 다음과 같은 대칭성과 주기성을 이용한다.

$$\textcircled{1} W_N^{k(N-n)} = W_N^{-kn} = (W_N^{kn})^*$$

$$\textcircled{2} W_N^{kn} = W_N^{k(N+n)} = W_N^{(k+N)n}$$

Goertzel 알고리즘은 길이 N을 가지는 finite sequence W_N^{kn} 의 주기성을 이용하여 계산량을 줄여 주는 방법이며, 식 (5)와 같은 특성을 이용한다.

$$\begin{aligned}
 X[k] &= Q_0 + Q_1 \times (-W_N^k) \\
 &= Q_0 + Q_1 \times (-e^{-2\pi k/N}) \\
 &= Q_0 - Q_1 \times (\cos(-2\pi k/N) + j\sin(-2\pi k/N)) \\
 &= Q_0 - Q_1 \cos(2\pi k/N) + jQ_1 \sin(2\pi k/N)
 \end{aligned}
 \tag{14}$$

또한, 다음과 같이 실수부와 허수부를 표현할 수 있다.

$$\begin{aligned}
 Re(X[k]) &= Q_0 - Q_1 \cos(2\pi k/N), \\
 Im(X[k]) &= Q_1 \sin(2\pi k/N)
 \end{aligned}
 \tag{15}$$

그러므로, 식 (15)로부터 특정 주파수 k 에 대한 입력 신호의 크기와 위상을 얻을 수 있다^[6].

3. 고조파 분석을 위한 보드 구성

MTE 장비뿐만 아니라 실제 계통에 연결하여 단상과 3상의 전압과 전류를 모두 측정할 수 있도록 하기 위해서 그림 3과 같은 구성을 갖는 보드를 개발하였다.

사용한 다채널 ADC 소자인 ADE9000^{[10],[11]}은 3상의 전압과 전류 각각을 동시에 처리할 수 있고, 또한, N상에 대해서도 동시에 처리할 수 있도록 7개의 ADC들이 하나의 소자에 내장되어 있다. 또한, 이들 7개의 샘플링된 데이터는 실시간으로 소자 내부 8 [kB] 메모리에 저장되도록 하였다. 그리고, 2개의 4 [KB] 크기로 나누어서 핑-퐁 버퍼(ping-pong buffer) 방식으로 처리하였다. 그리고, 소자와 MCU 사이의 통신은 SPI DMA 방식으로 10 [Mbps]의 고속으로 데이터를 취득하도록 하였다. [그림 4]는 다채널 ADC와 MCU 사이의 SPI DMA 인터페이스가 수행되는 파형을 보여준 것이다. MCU는 전력을 적게 소비하면서도 부동 소수 계산을 수행할 수 있는 Cortex-M4F core를 내장한 MCU를 선택하였다. MCU로 입력되는 3상의 전압과 전류 관련 데이터에서 2주기 분량의 데이터를 따로 구분하여 저장하기 위해서 zero-crossing 개념을 사용하였고, 역시, MCU 내부 메모리에 2개의 영역을 두어 핑-퐁 버퍼(ping-pong buffer) 방식으로 저장 한 이후 알고리즘과 관련된 계산을 수행하는 데 사용하였다^[5]. 즉, 분리한 2주기 데이터에 대해서 컴퓨터의 윈도우즈 응용 프로그램을 통하여 확인하고자 하는 2차에서 50차 사이의 고조파들을 지정하여 MCU에 요청할 수 있도록 하였다. 그리고, MCU는 요청받은 고조파 차수들에 대해서 입력으로 들어오는 계통의 전원을 구성하는 각각의 고조파를 분석하기 위하여 본 논문에서 개발한 고조파 분석 알고리즘을 수행하도록 하였다. 결과 값을 도출하면, 도출된 데이터는 다시 컴퓨터에 전송되어 현재 시각을 파일명으로 하여 일반 텍스트 파일 형식으로 저장하도록 하였다.

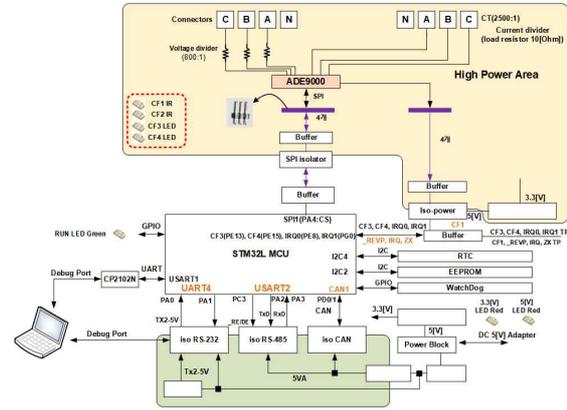


Fig. 3. Block diagram of harmonic analysis board.



Fig. 4. SPI DMA interface with ping-pong buffer.

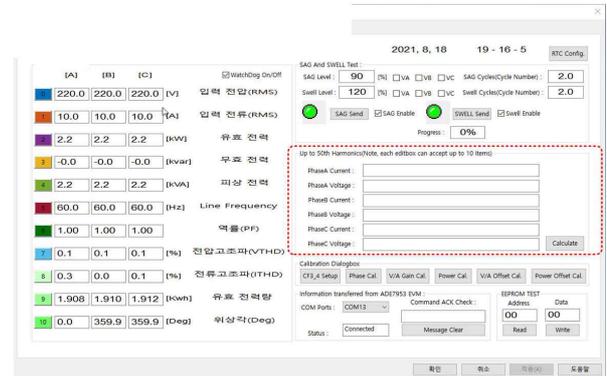


Fig. 5. Editboxes specified with any harmonic numbers.

그림 5는 본 실험을 위해서 개발한 윈도우즈 응용 프로그램이다. 구체적으로 확인하고 싶은 고조파들뿐만 아니라 다양한 계통 전원과 관련된 전압, 전류, 유효, 무효, 피상 전력, 유효 에너지, 위상, 역률, 그리고, SAG와 Swell 측정 등등 전원에 대한 다양한 품질을 표시해 주도록 개발하였다^[6].

그림 5의 점선 사각형 영역에 symbol “;”을 구분자로 사용하여 원하는 고조파들을 그림 6과 같이 지정해 주고, Calculate 버튼을 클릭하면, 지정한 고조파에 대한 분석을 수행하고 그 결과를 그림 6에서 보여준 것과 같이 데이터 파일로 생성해 준다. 3상의 경우에 전압과 전

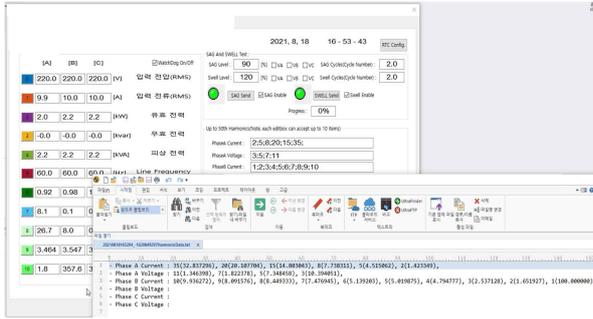


Fig. 6. The way how to specify any harmonic numbers.

류가 각각 3개이므로 총 6개의 고조파 정보들을 생성할 수 있는데, 각각에 대해서 최대 symbol “;”을 이용하여 10개까지 입력할 수 있도록 하였다. 그러므로, 한 번에 총 60개의 고조파 정보들을 얻을 수 있도록 개발하였다.

4. 고조파 분석 알고리즘에 대한 실험과 검증

식 (15)로부터 입력 신호에 포함되어 있는 특정 주파수 k 에 대한 크기와 위상을 얻을 수 있는 알고리즘을 개발하였고, 이 알고리즘을 이용하여 입력으로 주어진 단상 또는 3상 계통 전원에 포함되어 있는 2차부터 50차까지의 고조파 성분들을 각각 분석하기 위해서 다음과 같이 실험 환경을 구성하였다. 그림 7은 3상에 대한 실험 환경을 보여주고 있지만, 단상에 대한 실험도 수행할 수 있다.

3상 고조파 실험을 위해서 MTE 장비에 표 1과 같은 사양을 갖는 고조파들을 추가하였다. 여기서, 기본파를 100%로 하였다. 단, 일반적으로 25차 이하의 고조파에 관심을 가지며, 그 이상의 고조파에 대해서는 신호 자체의 크기와 높은 주파수 특성으로 오차가 높게 발생할 수 있다. 그러나, 본 논문에서는 25차 이상의 고조파에서도 5%의 이하의 정밀도를 갖도록 구현하였다.

그림 8은 표 1에서 보여준 고조파들을 주입한 경우에 본 논문에서 제안한 고조파 분석 보드에 인가되는 3상 전압과 전류를 함께 보여준 것이다.

그림 9는 그림 8과 같은 3상 전원이 인가되었을 때에 고조파 분석 보드가 분석한 결과이다. 표 2는 지정한 각각의 고조파 차수에 대한 값들과 본 논문에서 개발한 고조파 분석 알고리즘을 이용하여 계산한 결과 값을 비교한 것이다.

측정 결과 MTE에서 생성한 고조파와 비교하여 최대 1% 정도 오차가 발생하는 것을 알 수 있다.

5. 결 론

본 논문에서는 단상과 3상 계통 전원에 포함되어 있는 고조파 성분들을 2차부터 50차까지 홀수 차수뿐만 아니라 짝수 차수의 고조파를 포함하여 지정한 차수들

TABLE I
THE CONFIGURATION OF MTE EQUIPMENT FOR
3-PHASE HARMONIC ANALYSIS

3-phase current/voltage	The specification of harmonics from MTE	
	Order	Magnitude(%)
Phase A current	2	2
	5	5
	8	8
	15	15
	20	20
Phase A voltage	35	35
	3	10
	5	8
Phase B current	7	2
	11	1
	1	100
	2	2
	3	3
	4	4
	5	5
	6	6
	7	7
	8	8
9	9	
10	10	

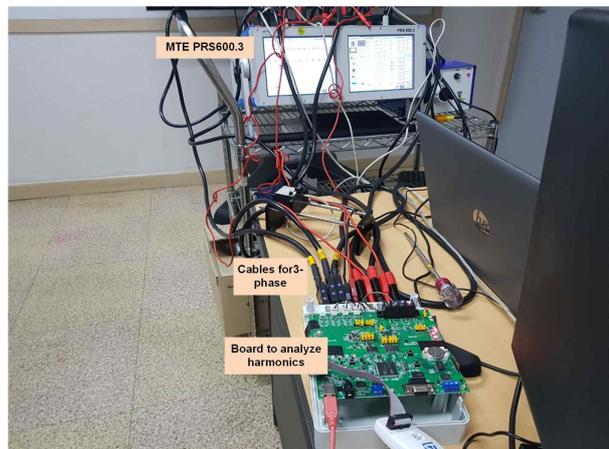


Fig. 7. Experiment to verify the frequency analysis algorithm of 1-phase/3-phase system harmonics.

에 대한 크기를 분석하여 계산해 주는 알고리즘을 제안하였다. 그러므로, 기존에 고조파 분석 기능을 지원하는 고가의 전용 반도체 소자를 사용할 필요 없이 소프트웨어적으로 구현하여 사용할 수 있으므로 제품의 단가를 낮추는 효과를 기대할 수 있다. 개발한 알고리즘에 대한 타당성을 검증하기 위하여 MTE 장비로 고조파를 입력하였고, 개발한 분석용 보드와 윈도우즈 응용 프로그램으로 결과를 표시하였다. 본 논문에서 개발한 고조파 분석 알고리즘에 대한 타당성을 실험 결과를 통하여 입증

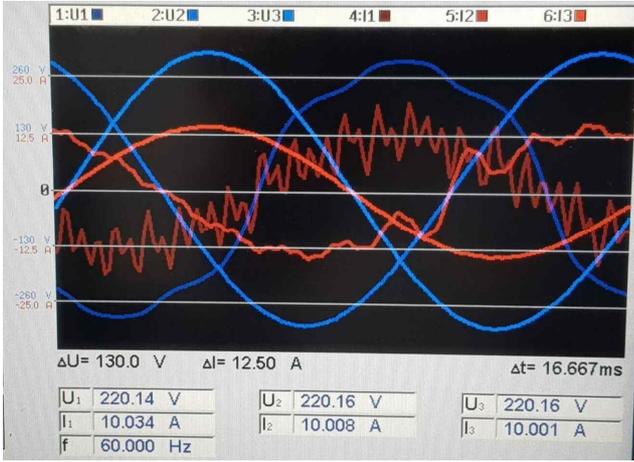


Fig. 8. 3-phase voltage and current including harmonics indicated.



Fig. 9. The result from 3-phase voltage and current including harmonics indicated.

TABLE II
THE RESULT FROM PROPOSED ALGORITHM ON HARMONIC ANALYSIS

3-phase current/voltage	The result from proposed algorithm on harmonics		
	Order	Mag(%)	Error(%)
Phase A current	2	1.423349	0.58
	5	4.515062	0.49
	8	7.738311	0.26
	15	14.803043	0.197
	20	20.107704	0.108
Phase A voltage	35	32.837296	2.16
	3	10.394051	0.39
	5	7.348458	0.65
	7	1.822378	0.178
	11	1.346398	0.34
Phase B current	1	100.00000	0
	2	1.651927	0.35
	3	2.537128	0.46
	4	4.794777	0.79
	5	5.019875	0.02
	6	5.139203	0.86
	7	7.476945	0.47
	8	8.449333	0.45
	9	8.091576	0.91
	10	9.936272	0.06

하였으며, 25차 이하에 대해서는 오차가 1%보다 작게 나타나는 것을 확인할 수 있었다. 그러나, 25차 이상의 고조파는 기본 주파수와 비교하여 그 크기가 상당히 적어서 정밀도가 떨어지므로 일반적으로 5% 이하의 정밀도를 갖게 된다. 일반적으로 3상 전원을 사용하는 제조 공장에서는 전력에 대한 다양한 부하에 의하여 장치들 사이에 너무 많은 고조파가 유입되는 경우에 오동작을 하는 경우가 많이 발생하고 있다. 따라서 본 논문에서 개발한 고조파 분석 알고리즘을 통하여 고조파로 인한 제품의 오동작을 막을 수 있어서 산업계에 유용하게 적용될 수 있다.

References

- [1] A. Ortiz, C. Gherasim and M. Manana, "Total harmonic distortion decomposition depending on distortion origin," *IEEE Transactions on Power Delivery*, Vol. 20, pp. 2651 - 2656, Oct. 2005.
- [2] S. Kosiorowski and A. Stobiecki, "Reduction of total harmonic distortion and effective source current in circuits with nonsinusoidal waveforms," *15th Selected Issues of Electrical Engineering and Electronics(WZEE)*, 2019.
- [3] V. Gosbell, "Harmonic distortion in the electrical supply system," *PQC Tech Note No. 3 (Power Quality Centre)*, Elliot Sound Products, Mar. 2000.
- [4] "Harmonics (electrical power)" *Wikipedia, The Free Encyclopedia*. Wikimedia Foundation, Inc. 4, Apr. 2011, We b. 5 Apr. 2011.
- [5] J. Lim and B. Lim, "Perfect practical guide for STM32 cortex-M," Vol. 1, 2022.
- [6] C. Jena and S. Mohapatra, "Power quality improvement by reduction of total harmonic distortion (THD) using P WM inverter," *International Journal of Innovative Technology and Exploring Engineering(IJITEE)*, Vol. 9, No. 2, Dec. 2019.
- [7] G. Goertzel, "An algorithm for the evaluation of finite trigonometric series," *American Mathematical Monthly*, Vol. 1. 65 No. 1, pp. 34 - 35, Jan. 1958.
- [8] Chen and J. Chiouguey, "Modified goertzel algorithm in DTMF detection using the TMS320C80 DSP," *Application Report, Texas Instruments*, SPRA066, Jun. 1996.
- [9] Gentleman, W. M., "An error analysis of goertzel's (Wat t's) method for computing fourier coefficients," *The Computer Journal*, Vol. 12, No. 2, pp. 160 - 164, Jan. 1969.
- [10] F. Lim. "I2C interface between the ADE7953 and the A DuCM360," *Analog Devices Inc. Application Note*, AN-1367, Feb. 2015.
- [11] A. Heredia, "Harmonic analysis using the ADE9000," *Analog Devices Inc. Application Note*, AN-1483, Feb. 2017.



임종수(林鍾洙)

1970년 1월 14일생. 1993년 건국대 전자공학과 졸업. 1998년 동 대학원 전자공학과 졸업(석사). 2020년 한경 대학원 신재생에너지과 수료(공박). 1999년 6월~2001년 4월 현대전자 정보통신연구소 연구원. 2001년 4월~2010년 2월 삼성전자 네트워크 사업부 책임연구원. 2010년 2월~2018년 7월 Analog Devices Inc. 수석 연구원. 2018년 8월~현재 수진 사장.



이택기(李宅基)

1963년 9월 4일생. 1987년 한양대 전기공학과 졸업, 1989년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사). 1993년 동 대학원 전기공학과 졸업(공박). 1994년 서남대 전기공학과 전임강사. 2010년 2월~2011년 1월 성균관대 연구교수. 2018년 2월~2019년 1월 University of Colorado Denver Visiting Scholar. 1996년~현재 한경대 전자전기공학부 교수. 당학회 명예회장.