

# 시주파수 표현법을 이용한 소리신호의 분석

## Sound Signal Analysis Using the Time-Frequency Representations

임 병 관\*★

Byeong-Gwan Iem\*★

### Abstract

Time-frequency representations are methods to display the magnitude or energy density of a signal on the two dimensional plane of both time and frequency. They are useful in analyzing the characteristics of time-varying signals. Music is a typical time-varying signal, and it can be analyzed by time-frequency representations. Recently, it is popular to change the sound quality by attaching a sounder to an instrument. It is performed to improve perception subjectively by spending little cost and modifying sound quality. In time domain, it is difficult to notify the difference between music signals with and without the sounder. But, it is easy to find the difference in frequency domain or in time-frequency domain. In this paper, the music signal from a flute with sounder is analyzed both in the frequency domain and in the time-frequency domain. It is confirmed that the frequency components in the mid-frequency range of 500~2500 are reinforced.

### 요 약

시주파수 표현법은 시간과 주파수의 2차원 평면에 대하여 신호의 크기 혹은 에너지 밀도의 분포를 표현하는 방법이다. 이러한 기술은 시변 신호(Time-varying signal)의 특성 분석에 유용하다. 연주음은 대표적인 시변신호이며 특성 분석을 위하여 시주파수 표현법을 사용할 수 있다. 최근 악기에 사운더를 부착하여 음질을 변화시키는 작업이 주목 받고 있다. 비교적 저렴한 비용을 지불하고 음질을 변화시켜 주관적인 평가를 개선하려는 시도로 시행되고 있다. 이러한 연주신호는 시간영역에서는 사운더가 없는 악기 원형으로 연주한 경우와 차이점을 찾기가 어렵지만 주파수 영역, 그리고 시간-주파수 영역에서 분석하면 차이점을 쉽게 볼 수 있다. 본 논문에서는 사운더를 부착한 악기의 연주신호를 주파수 영역에서 분석하여 사운더의 효과를 확인하고 더 나아가 시주파수 표현법을 활용하여 사운더의 영향을 분석한다. 악기에 따라 사운더의 효과는 다르지만 대체로 인간의 주관적인 평가에 영향을 주는 중간주파수대에서 강화된 효과를 확인할 수 있다.

*Key words : time-frequency representation, sounder, music signal, Fourier transform, time-varying signals*

\* Dept. of Electronic Eng., Gangneung-Wonju Nat. Univ.

★ E-mail : ibg@gwnu.ac.kr, Tel: +82-33-640-2426

※ Acknowledgment

This work was supported by the 2016 research fund of Gangneung-Wonju National University.

Manuscript received Sep. 5, 2019; revised Sep. 24, 2019; accepted Sep. 25, 2019.

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.

## I. 서론

악기의 연주음에 대한 신호분석 및 처리는 오랜 연구주제로 주목 받아왔다[1]-[7]. 대표적인 예로는 단일 채널로 녹음된 여러 악기의 연주음을 신호처리 기법을 이용하여 각 악기의 연주음을 추출하는 연구를 들 수 있다[1][2]. 각 악기의 연주음을 추출하기 위하여 연주음의 시주파수 성분을 추출하여 피치정보를 비교한 후 각 악기의 연주음 성분을 추출한다[2]. 유사하게 시주파수 영역에서 악기의 멜

로디나 베이스 음을 추정하는 연구[3], 시주파수 분석법을 사용하여 음향학적인 신호를 분류하는 연구[4], 매칭 퍼숫 기법을 이용해 연주악기를 분류하는 연구[5], 음향학적인 신호의 특성을 검출하는 연구[7] 등이 있다. 이렇듯 시주파수 분석법은 음악신호의 분석, 분류 등과 관련하여 다양하게 활용되어 왔다.

최근 악기에 세이프티 사운더라는 보형물을 부착하여 악기의 주관적인 음질을 개선하려는 시도가 있어 왔으며 일부 사운더는 상용화되었다. 이러한 시도는 저렴한 보급형 악기에 사운더를 부착하는 것만으로 연주음의 음질을 변화해 주관적인 만족을 준다는 점에서 주목 받고 있다. 이러한 사운더를 부착한 악기의 연주음은 악기 원형의 연주음과 비교해서 주관적인 음질 평가가 다름에도 시간영역에서 관찰해보면 그 차이를 구별하기가 어렵다. 따라서, 본 논문에서는 주파수 영역, 그리고 시주파수 영역에서 신호를 비교하여 차이를 비교하고자 한다. 결과로 악기에 대한 사운더의 영향을 확인할 수 있는 객관적인 데이터를 확보할 수 있다.

본 논문은 다음과 같이 구성되어 있다. 2장에서는 사운더가 부착된 악기의 모습을 소개하고, 사운더 부착 전후의 악기의 연주음을 시간영역에서 비교한다. 3장에서는 대표적인 신호 분석 도구인 푸리에 변환과 시간주파수 분석법을 소개한다. 시간주파수 분석법으로는 short-time 푸리에 변환과 스펙트로그램을 중심으로 살펴본다. 4장에서는 컴퓨터를 활용하여 3장에서 소개한 분석법으로 악기 연주음을 분석하여 사운더의 효용성을 검증하며 5장에서 결론을 맺는다.

## II. 본론

### 1. 사운더를 부착한 악기의 연주 신호

아래 그림 1은 사운더를 다양한 위치에 부착한 플루트를 보인다. 사운더는 금속제로 제조된 보형물로 악기의 머리부분, 목부분, 몸체, 끝부분 등에 적용할 수 있다. 그림 1에서 사운더는 왼쪽부터 각각 플루트의 머리, 몸체, 끝부분에 부착된 모습을 보인다.

그림 2는 이러한 사운더를 부착하기 전후의 악기의 연주음을 시간영역에서 10초 분량 관찰한 그림이다. 그림 2 (a)는 사운더를 부착하기 전의 연주음이고 그림 2 (b)는 사운더를 부착한 후에 연주한

결과이다. 실제 사운더 부착 전후의 연주음을 청취했을 때, 주관적으로 두 연주음의 차이를 뚜렷하게 느낄 수 있음에도 불구하고, 그림에서 볼 수 있듯이 연주음에 주는 영향을 시간영역에서는 확인하기가 어렵다. 따라서, 주파수 영역 혹은 시간주파수 영역에서 신호를 분석할 필요가 있다.

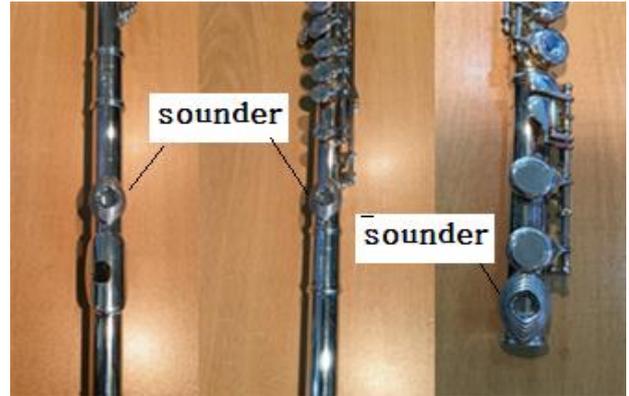


Fig. 1. Flute with a sounder at head, body, and tail.  
그림 1. 사운더를 각각 머리, 몸체, 끝부분에 부착한 플루트

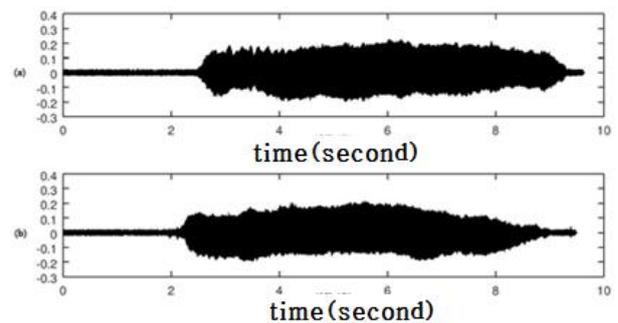


Fig. 2. Music signal before/after sounder attachment  
(a) without sounder (b) with sounder.

그림 2. 사운더 부착 전후의 연주음  
(a) 사운더 부착 전 (b) 사운더 부착 후

### 2. 주파수분석도구

시간영역의 신호  $x(t)$ 에 대한 주파수 성분을 확인하기 위한 도구인 푸리에 변환  $X(f)$ 는 다음과 같이 정의된다 [8].

$$X(f) = \int_{-\infty}^{\infty} x(t)e^{-j2\pi ft} dt \tag{1}$$

여기에서  $x(t)$ 는 연속시간 영역에서의 신호이며  $X(f)$ 는 그 신호의 연속 주파수 영역에서의 표현이다. 신호가 이산신호인 경우 이산 푸리에 변환이 사용되며 다음 식으로 정의된다[8].

$$X[k] = \sum_{n=0}^{N-1} x[n] e^{-j2\pi nk/N}, \quad 0 \leq k \leq (N-1) \quad (2)$$

여기에서  $x[n]$ 은 이산시간 영역에서의 신호로 0에서  $(N-1)$ 까지  $N$ 개의 샘플로 이뤄지며, 그 주파수 성분은 이산주파수 영역에서의 신호  $X[k]$ 로 주어진다.

### 3. 시간주파수 분석법

앞 절의 푸리에 변환은 신호의 특성이 시간의 경과와 함께 변화하지 않는 경우 혹은 스테이션너리(stationary) 신호인 경우에 주파수 분석 도구로 유용하다. 음성이나 음악 연주음과 같이 시간의 경과와 함께 신호의 특성이 변화하는 경우 푸리에 변환은 신호의 특성을 적절히 표현하지 못한다. 즉, 신호의 전체적인 주파수 성분은 보여주지만 언제 어떤 주파수 성분이 발생하는지 알려주지 못한다. 이와 같이 시간과 주파수 정보를 동시에 분석할 필요가 있을 때 유용한 도구가 시간주파수 표현법이다[9]. 지난 30여년간 다양한 시간주파수 분석법이 연구 소개되어 왔으며 신호의 시간주파수 특성에 따라 최적의 시간주파수 표현법이 정해진다[9]. 통상의 신호에 대하여 편리하게 사용되는 대표적인 시간주파수 분석법으로는 short-time 푸리에 변환(short-time Fourier transform, STFT)과 이에서 파생된 스펙트로그램이 있다[9]. STFT는 시간영역에서 신호의 일정구간에 대하여 푸리에 변환을 구하는 방법으로 신호의 일정구간을 취할 때는 윈도우함수를 사용한다. 따라서, 사용되는 윈도우함수에 따라 다른 결과를 보인다. 사용되는 윈도우함수를  $g(t)$ 라 할 때 신호  $x(t)$ 의 STFT  $X(t, f)$ 는 아래와 같이 정의된다.

$$X(t, f) = \int_{-\infty}^{\infty} x(t') g(t' - t) e^{-j2\pi f t'} dt' \quad (3)$$

여기에서  $t'$ 은 윈도우함수 내에서의 시간이며  $t$ 는 윈도우함수를 신호의 시간영역에서 이동시킬 때의 기준시간이다. 신호가 이산시간영역에서의 샘플로 주어지는 이산신호일 때, STFT 역시 이산영역에서 다음과 같이 정의된다.

$$X[n, k] = \sum_{m=0}^{N-1} x[m] g[m-n] e^{-j2\pi mk/N}, \quad 0 \leq k \leq (N-1) \quad (4)$$

$g[n]$ 은 길이가  $N$ 인 이산 윈도우함수이다. STFT은 윈도우 함수로 취해진 유한한 길이의 신호의 푸리에 변환이기 때문에 복소수 값을 갖는다. 따라서, 시주파수 영역에서 신호의 주파수 특성 변화를 이해하기 위해 STFT의 크기의 제곱을 취하며 이를 Spectrogram(SPEC)으로 다음과 같이 정의하며 소리와 같은 신호의 분석에 활발히 사용되어 왔다.

$$SPEC_X(n, k) = |X[n, k]|^2 \quad (5)$$

STFT와 스펙트로그램은 윈도우로 시간영역에서 제한된 신호의 푸리에변환이기 때문에 신호의 불확정성 원리의 지배를 받는다[9]. 따라서, 시간영역과 주파수영역에서의 해상도를 동시에 좋게 할 수 없다. 즉, 윈도우함수의 길이가 짧으면 시간영역의 해상도가 좋은 반면 주파수영역의 해상도는 저하되며, 반대로 윈도우함수의 길이가 길면 시간영역의 해상도는 저하되지만 주파수영역의 해상도는 좋아진다. 본 논문에서는 대상악기가 플룻인 점을 감안하여 주파수 해상도를 개선하도록 윈도우함수의 길이를 적절히 설정하여 사운더의 효과를 검증한다.

### 4. 컴퓨터 모의실험

컴퓨터 모의 실험은 두 종류의 신호를 대상으로 시행된다. 첫번째 신호는 세가지 옥타브에서 연주되는 으뜸음('도'음)을 대상으로 하며, 시간에 따른 주파수 변화가 거의 없으므로 푸리에 변환만을 활용하여 사운더의 효과를 검증한다. 두번째 신호는 동일 옥타브의 음으로 '도'에서 시작해서 '시'까지 연속으로 연주되는 신호를 분석한다. 시간에 따라 주파수가 변화하므로 스펙트로그램을 활용하여 사운더의 효과를 확인한다. 그림 3, 그림 4, 그림 5는 세가지 옥타브에서 연주된 '도' 음을 시간영역과 주파수영역에서 비교한 결과이다. 각 그림에서 (a)는 사운더 부착전 시간영역에서의 신호이고 (b)는 사운더 부착 이후 시간영역에서 신호이다. (c)는 사운더 부착전에 주파수영역에서의 신호이며 (d)는 사운더 부착후 주파수영역에서의 신호이다. 각 그림의 (a)와 (b)를 비교하면 시간영역에서는 사운더의 효과를 확인하기가 어렵다. 그러나 (c)와 (d)의 주파수영역의 결과를 비교하면 사운더의 효과를 확인할 수 있다.

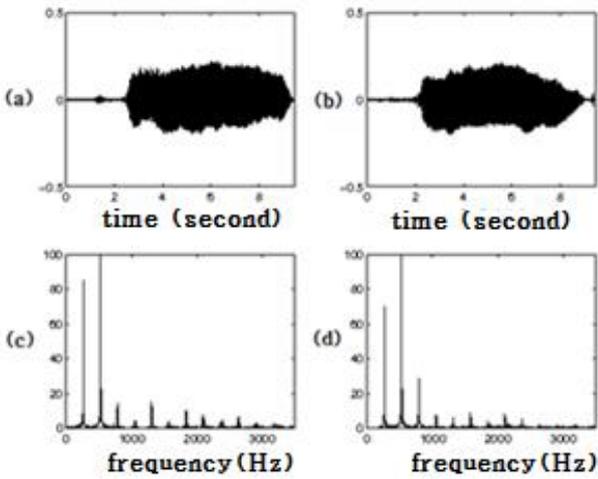


Fig. 3. 'Do' sound of the first octave (a) without sounder in time (b) with sounder in time (c) without sounder in frequency (d) with sounder in frequency.

그림 3. 첫번째 옥타브 '도'음의 분석 (a) 사운더 없는 연주음 (b) 사운더 부착후 연주음 (c) 사운더 없는 연주음의 푸리에변환 (d) 사운더 부착후 연주음의 푸리에변환

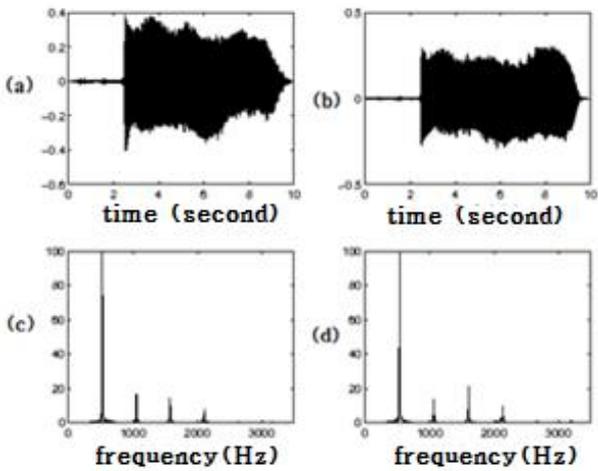


Fig. 4. 'Do' sound of the second octave (a) without sounder in time (b) with sounder in time (c) without sounder in frequency (d) with sounder in frequency.

그림 4. 두번째 옥타브 '도'음의 분석 (a) 사운더 없는 연주음 (b) 사운더 부착후 연주음 (c) 사운더 없는 연주음의 푸리에변환 (d) 사운더 부착후 연주음의 푸리에변환

그림 3 (c)와 그림 3(d)를 비교하면 사운더를 부착한 경우에 2번째 고조파 성분이 더 강화된 점을 확인할 수 있으며 플롯의 주요 주파수대가 500~2500 Hz임을 고려할 때 [10], 이러한 강화된 고조파 성분이 주관적으로 더 좋은 평가를 받을 수 있을

것이다. 그림 4와 그림 5에서도 유사한 결과를 보여주고 있다.

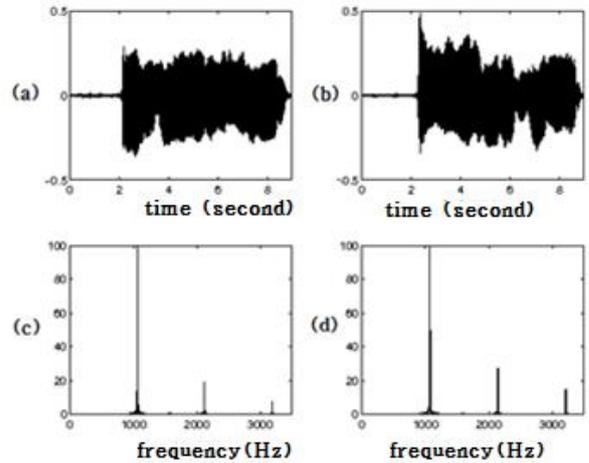


Fig. 5. 'Do' sound of the third octave (a) without sounder in time (b) with sounder in time (c) without sounder in frequency (d) with sounder in frequency.

그림 5. 세번째 옥타브 '도'음의 분석 (a) 사운더 없는 연주음 (b) 사운더 부착후 연주음 (c) 사운더 없는 연주음의 푸리에변환 (d) 사운더 부착후 연주음의 푸리에변환

그림 6과 그림 7의 모의실험은 '도'에서 '시'까지 연속으로 연주된 신호를 스펙트로그램으로 비교 분석한 결과이다. 그림 6 (a)와 그림 7 (a)는 사운더 부착전과 부착후의 연주음을 시간영역에서 표현한 그림이다. 그림 6 (b)와 그림 7 (b)는 시주파수 영역에서 스펙트로그램 결과를 등고선으로 표

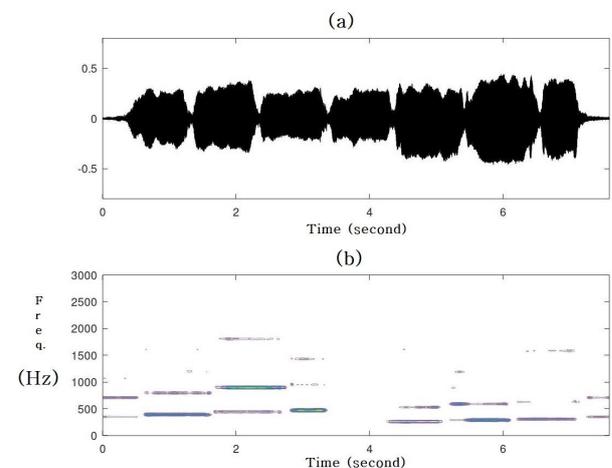


Fig. 6. music signal without sounder (a) signal in time (b) spectrogram.

그림 6. 사운더 부착전의 연주음 신호 (a) 시간영역의 신호 (b) 스펙트로그램

현한 것으로 가로축이 시간이며 세로축은 주파수이다. 등고선 그림은 각각 최대값으로 정규화되었으며 최대값의 15%에서 시작해서 100%까지 15%의 간격으로 표현한 결과이다. 스펙트로그램 계산과정에서 윈도우함수는 길이가 441인 한닝(Hanning) 윈도우 함수를 사용했다. 연주음의 주파수 특성이 시간과 함께 변화하는 것을 시간주파수 영역에서 확인할 수 있다. 특히 그림 7 (b)의 사운더가 있는 경우가 고조파 성분이 강화된 것을 확인할 수 있다.

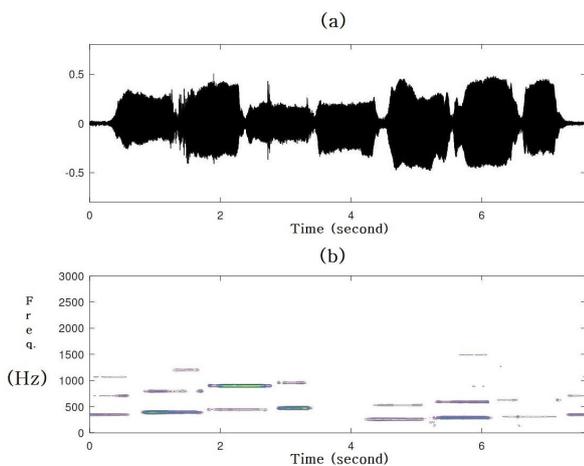


Fig. 7. music signal with sounder  
(a) signal in time (b) spectrogram.

그림 7. 사운더 부착후의 연주음 신호  
(a) 시간영역의 신호 (b) 스펙트로그램

### III. 결론

사운더라는 보형물을 부착한 플롯의 연주음을 주파수영역 및 시간주파수영역에서 비교 분석하였다. 기본주파수와 고조파성분만이 존재하는 단음 ‘도’의 경우 푸리에 변환을 활용한 주파수 분석만으로도 보형물을 부착한 경우의 신호와 보형물이 없는 경우의 신호 사이의 차이를 확인할 수 있었다. 대체로 두 번째와 세 번째 고조파성분이 강화되어 결과적으로 플롯의 주파수 영역인 500~2500 Hz 사이에서 보형물이 없는 경우보다 주파수 특성이 개선된다. 연속해서 ‘도’에서 ‘시’까지 연주하는 경우는 주파수가 시간과 함께 변화하기 때문에 푸리에 변환만으로는 보형물의 효과를 확인할 수 없다. 비교적 간단한 구조의 시주파수 분석법인 스펙트로그램을 활용하여 연주음을 비교했으며, 보형물이 있는 경우의 스펙트로그램에서 고조파성분이 일부

개선된 것을 확인했다. 따라서, 악기에 보형물을 부착해서 연주하면 물리적으로 공명의 길이를 조정하여 고주파성분이 강화되는 효과를 볼 수 있음을 알 수 있었다.

### References

- [1] Y. Li and D. Wang, “Musical Sound Separation Using Pitch - based Labelling and Binary Time-Frequency Masking,” pp.173-176, *Proc. of ICASSP*, 2008.
- [2] Y. Li, J. woodruff, and D. Wang, “Monaural Musical Sound Separation Based on Pitch and Common Amplitude Modulation,” *IEEE Trans. On Audio, Speech, and Language Processing*, Vol.17, No.7, pp.1361-1371, 2009.  
DOI: 10.1109/TASL.2009.2020886
- [3] Y. Uchida and S. Wada, “Melody and Bass Line Estimation Method using Audio Feature Database,” *Proc. of 2011 IEEE Int. Conf. on Sig. Proc., Comm. and Comp. (ICSPCC)*, 2011.  
DOI: 10.1109/ICSPCC.2011.6061662
- [4] G. Yu and J. Slotine, “Audio Classification from Time-Frequency Texture,” *Proc. of ICASSP*, pp.1677-1680, 2009.  
DOI: 10.1109/ICASSP.2009.4959924
- [5] F. Yu and Y. Chen, “Musical Instrument Classification based on Improved Matching Pursuit with Instrument Specific Atoms,” *Proc. of the 4<sup>th</sup> Int. Congresson Advanced Applied Informatics*, pp.506-510, 2015. DOI: 10.1109/IIAI-AAI.2015.208
- [6] D. Giannoulis, D. Barchiesi, A. Klapuri and M. Plumbley, “On the Disjointness of Sources in Music Using Different Time-Frequency Representations,” *Proc. Of IEEE Workshop on Applications of Signal Processing to Audio and Acoustics*, pp. 261-264, 2011. DOI: 10.1109/ASPAA.2011.6082321
- [7] P. Guillemain and R. Kronland-Martinet, “Characterization of Acoustic Signals through Continuous Linear Time-Frequency Representations,” *Proc. of the IEEE*, Vol.84, No.4, pp.561-585, 1996. DOI: 10.1109/5.488700
- [8] L. F. Chaparro, *Signals and Systems Using*

*Matlab*, Academic Press, 2015.

[9] F. Hlawatsch and G. F. Boudreaux-Bartels, "Linear and Quadratic Time-Frequency Representations," *IEEE Signal Proc. Mag.* Vol.9, No.2, pp.21-67, 1992. DOI: 10.1109/79.127284

[10] R. D. Ford, *Introduction to Acoustics*, Elsevier, 1970.

---

## BIOGRAPHY

---

### **Byeong-Gwan Iem** (Member)



1988 : BS degree in Electronic Engineering, Yonsei University.

1990 : MS degree in Electronic Engineering, Yonsei University.

1998 : PhD degree in Electrical Engineering, University of Rhode Island.

1999~2001 : Senior Engineer, Samsung Electronics.

2002~Present : Professor, Ganeung-Wonju National University