

HRV 신호의 웨이브렛 변환에 의한 마취단계별 마취심도 평가 파라미터 개발

전계록¹, 김명철², 한봉효², 예수영³, 노정훈⁴, 백승완^{5*}
¹부산대학교 의학전문대학원 의공학교실, ²부산대학교 의공학협동과정,
³부산대학교 의학전문대학원 BK21 사업단, ⁴부산대학교병원 의공학과
⁵부산대학교 의학전문대학원 마취통증학교실

A Evaluation Parameter Development of Anesthesia Depth in Each Anesthesia Steps by the Wavelet Transform of the Heart Rate Variability Signal

Gye Rok Jeon¹, Myung Chul Kim², Bong Hyo Han², Soo Yung Ye³,
Jung Hoon Ro⁴ and Seong wan Baik^{5*}

¹Department of Biomedical Engineering, College of Medicine, Pusan University, ²Dept. of
Interdisciplinary Program in Biomedical Engineering, Graduate School, Pusan University, ³BK21
Medical Science Education Center, College of Medicine, Pusan University, ⁴Department of Biomedical
Engineering, College of Medicine, Pusan University,
⁵Department of Anesthesia and Pain Medicine, School of Medicine, Pusan University

요 약 본 연구에서는 마취 단계에서 마취 심도 평가를 위한 파라미터 추출을 수행하였다. 연구대상은 평균 나이 42 ± 9.13세, 신체등급 분류상 1 또는 2 등급에 속하는 산부인과 수술 환자를 선택하였다. 투약제로는 Enflurane으로 전신 마취를 시행하였다. HRV 신호는 ECG 신호로부터 R 피크치 검출 알고리즘에 의해 획득 되었다. HRV 데이터는 전처리 단계를 거쳤고, 마취 단계별 마취심도 평가 파라미터를 개발하기 위하여 마취단계를 마취 전, 마취유도, 수술 중, 각성, 마취 후 등으로 구분하여 시행하였다. 본 연구에서는 마취단계에서 웨이브렛 변환을 이용한 HRV신호 분석 알고리즘이 제안되었다. 세 종류의 웨이브렛 함수를 적용한 PSD 분석 결과 마취 단계에 따라 모두 비슷한 양상을 나타내었으나, 이들 중 Daubeches 10의 실험 결과가 보다 양호하게 관측되어 마취 단계별 마취심도를 평가할 수 있는 특징 파라미터로서 가장 적절하다는 판단하였다.

Abstract In this study, the parameter extraction for evaluation of the anesthesia depth in each anesthesia stages was conducted. An object of the this experiment study has studied 5 adult patients (mean ± SD age:42 ± 9.13), ASA classification I and II, undergoing surgery of obstetrics and gynecology. Anaesthesia was maintained with Enflurane. HRV signal was created by R-peak detection algorithm form ECG signal. The HRV data were preprocessing algorithm. It has tried find out the anesthesia parameter which responds the anesthesia events and shows objective anesthesia depth according to anesthesia stage including pre-anesthesia, induction, maintenance, awake and post-anesthesia. In this study, proposed algorithm to analysis the HRV(heart rate variability) signal using wavelet transform in anesthesia stage. Three sorts of wavelet functions applied to PSD. In the result, all of the results were showed similarly. But experiment results of Daubeches 10 is better. Therefore, this parameter is the best parameter in the evaluation of anesthesia stage.

Key Words : HRV, Depth of anesthesia, Wavelet transform,

본 논문은 과학재단 특정기초 연구과제(R01-2007-000-20260-0) 의해 연구되었음.

*교신저자 : 백승완(swbaik@pusan.ac.kr)

접수일 09년 05월 21일

수정일 (1차 09년 07월 13일, 2차 09년 07월 24일)

게재확정일 09년 09월 16일

1. 서론

심혈관계 (CVS, cardiac vascular system)는 자율신경계 (ANS, autonomous nervous system)의 작용을 가장 잘 반영하고 있으며 ANS의 교감신경계 (sympathetic nervous system)과 부교감신경계 (parasympathetic nervous system)은 서로 길항적이고 동적인 균형을 이루고 있다[1]. 따라서 심박변이율 (HRV, heart rate variability)을 측정함으로써 ANS의 기능을 평가할 수 있다. 이러한 ANS의 영향을 평가하기 위해 HRV 신호의 전력스펙트럼을 분석하여 각각의 주파수 대역별로 ANS의 조절 작용을 평가하는 연구들이 수행되었다[2].

1970년대부터 많은 연구자들에 의해 HRV 신호를 이용하여 마취 중 마취심도를 평가하려는 연구가 수행되었다. 1992년 Kato 등[3]은 흡입 전신마취 동안의 HRV 신호를 관측하고 이를 주파수영역에서 분석한 후 ANS의 활성도와와의 상관관계를 규명하는 연구를 수행하였다. 그리고 1996년 Ireland 등[4]은 전신마취 유도에서부터 마취에서 깨어나는 기간 동안 환자 HRV 신호의 동적 특성 변화를 관찰하여 마취 전·후의 심전도 (ECG, electro cardiogram), 의식수준, 구역, 통증, 그리고 혈압의 변화 등 마취환자의 상태 변화를 감지하기 위한 연구를 수행하였다. 그리고 2001년 V. Pichot 등[5]은 일반적인 마취 상태 하에서 예상되지 못한 각성 상태의 출현에 관한 연구를 수행하였다. Pichot는 HRV 신호를 이용하여 ANS 활성도를 평가하기 위하여 웨이브렛 변환 (WT, wavelet transform) 기법을 사용하였다[6].

마취란 유해한 외부 자극에 대해 환자의 움직임이 없고, 수술 중 무의식 (hypnosis), 기억상실 (amnesia), 진통, 근 이완, 자율신경반사의 저하 등 각성이 없는 상태를 의미한다[7]. 그러나 마취를 시행한 후 수술 중에 통증이 동반되는 회상 (conscious awareness)이나 통증을 동반하지 않은 회상이 발생할 수 있고, 의식이 없는 인지 (perception) 상태가 발생할 수도 있다. 그러므로 수술이 진행되는 동안에 환자가 불유쾌한 회상을 경험하지 않도록 적절한 마취심도를 유지하는 것이 매우 중요하다 [8],[9]. 따라서 임상에서는 수술중 적절한 마취심도 및 환자상태를 감지하기 위하여 환자 감시 장치 (patient monitoring system)를 사용하고 있다. 일반적으로 마취심도의 분석을 위하여 중추신경계 (CNS, central nervous system)과 ANS의 활성도를 평가하는 방법을 사용하고 있다. 이들 중 CNS의 활성도 평가를 위해서는 뇌전도 (EEG, electro encephalogram) 신호를 분석하여 환자의 진정 수면상태를 분석하여 지수로 나타내는 바이스펙트럼인덱스시스템 (BIS, bisppectral index system, ASPECT

Co., USA)이 개발되어 임상에 적용되고 있다. 그리고 ANS의 활성도 평가를 위해서는 ECG 신호를 HRV 신호로 재구성하여 HRV 신호의 변이 양상을 지수로 나타내는 아네몬-1 (Anemon-1, MCSA Co., Switzerland) 시스템이 임상에 적용되고 있다. 하지만 이러한 시스템들은 마취약제의 종류 및 환자의 상태에 따른 지수의 편차가 크게 발생하여 마취심도를 객관적이고 정량적으로 평가하기에는 한계가 있으므로 실제 임상에 활용되는 빈도가 낮은 실정이다[10].

본 논문에서는 HRV 신호를 이용하여 마취 중 환자의 ANS의 영향을 관찰하기 위해 웨이브렛 변환 기법 중 다우비치 (daubeche) 및 코이플렛 (cooiflet) 변환 기법을 적용하여 마취단계별로 교감신경계와 부교감신경계의 활성도 변이 양상을 분석하고자 하였다.

2. 본론

본 연구에서는 기존에 연구되고 있는 마취심도 평가 방법을 개선하여 실제 임상에 유용하게 사용할 수 있는 보다 객관화된 마취심도 평가 방법을 제시하고자 하였다. 즉 마취단계별로 환자로부터 획득한 ECG 신호를 선행 연구[11],[12]에서 제안한 전처리과정을 거쳐 시계열 HRV 신호로 재구성한 후 재구성된 HRV 신호를 웨이브렛 변환 기법을 적용하여 마취단계별 마취심도를 평가할 수 있는 파라미터를 추출 하였다.

2.1 연구대상

본 연구에서는 마취 환자의 ECG 신호를 계측하기 위하여 부산대학교병원 산부인과에 내원한 수술 환자 중 비교적 수술시간이 짧고 전신 흡입마취 시술을 받는 환자를 대상으로 실험을 수행하였으며, 사전에 수술 대상 환자에게 연구의 취지를 설명하고 환자의 동의를 받은 후 ECG 신호를 획득하였다. 실험대상군은 35세 이상 55세 이하의 산부인과 환자 5명이며, 환자의 평균 나이는 42 ± 9.13 세, 평균 몸무게는 56.5 ± 6.7 Kg이었다. 그리고 정규 검사에서 고혈압이나 CVS 질환의 병력이 없는 미국 마취과학회 신체등급 분류상 1 또는 2 등급에 속하는 환자를 선택하였다. 투약제로는 GPR 0.2 mmg 과 Dormiam 2mmg 투여하였고, Enflurane으로 전신마취를 하였다.

2.2 HRV 신호 획득

ECG 신호를 획득하기 위하여 생체신호계측기 (PhysioLab 400, PhysioLab Co., KOREA)를 사용하였고

Lead 1 전극법을 이용하였다. ECG 신호를 1K의 이득으로 증폭하였으며, 차단주파수가 150 Hz인 저역통과필터(LPF, low pass filter)와 차단주파수가 0.02 Hz인 고역통과필터(HPF, high pass filter), 그리고 60 Hz 잡음의 제거를 위한 노치필터(notch filter)를 사용하여 ECG 신호를 측정하였다. 그리고 측정된 ECG 신호를 256 Hz로 샘플링 하였으며 12 bit로 양자화하여 디지털 신호로 변환하였다. 변환된 ECG 신호의 R 정점을 검출한 후 연속 ECG 신호의 R 정점들 간의 시간을 측정하여 HRV 신호를 구성하였다. 구성된 HRV 신호를 2 Hz로 재샘플링(resampling)하여 HRV 신호를 재구성하였다.

2.3 HRV 신호의 전력 스펙트럼

HRV 신호는 HR의 변이 양상을 나타내므로 끊임없이 변화하는 여러 가지 신체조건과 주위 환경에 대응하는 CVS의 제어 메커니즘에 의해 발생된다. 따라서 HRV는 CVS의 병리·생리학 적인 상태를 평가하는데 있어 매우 중요한 정량적인 지표를 제공한다. 그리고 HRV 신호는 ANS의 조절 형태에 관한 정보를 제공한다. HRV 신호의 주요 주파수 성분에 관련된 생리학적 메커니즘은 표 1과 같다.

[표 1] HRV 신호의 주요 주파수 성분에 관련된 생리학적 메커니즘

	Frequency range	Relevant nervous system
VLF	0.002 - 0.05Hz	Renin-angiotensin, Thermo regulatory, Hormone system
LF	0.05 - 0.15Hz	SNS, PSNS, Baroreceptor, Vasomotor
HF	0.15 - 0.5Hz	PSNS, Respiratory
LF/HF	Automatic balance	Autonomic balance of the SNS & PSNS

Legend:

- VLF: Very Low Frequency,
- LF: Low Frequency,
- HF: High Frequency,
- SNS: Sympathetic Nervous System,
- PSNS: Parasympathetic Nervous System

따라서 HRV 신호를 푸리에 변환하여 주파수 영역에서 분석하면 HR를 제어하는 ANS의 조절 기능을 평가할 수 있다.

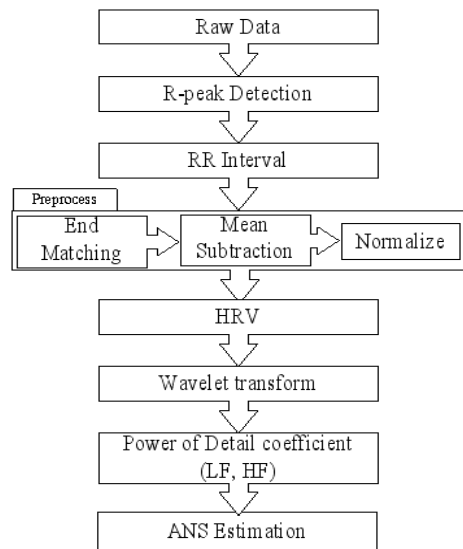
2.4 마취단계 구분

마취단계별 ANS 영향을 평가하기 위하여 마취단계를 표 2와 같이 구분하였다. 즉 마취전, 마취유도, 수술중, 각성, 마취후 등으로 구분하였다.

[표 2] 마취단계 구분

Stages	Explanation
Pre-anesthesia	Normal state before anesthesia
Induction	Anesthetic state using thiopental
Maintenance	Anesthetized with enflurane
Awake	Stop operation and After-intubation
Post-anesthesia	Next day

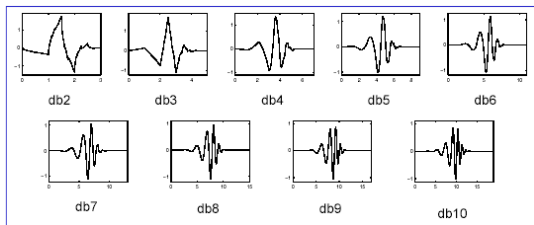
마취 전·중·후 환자로부터 획득된 ECG 신호에서 R 정점들을 검출하여 RR 간격 시계열 HRV 신호를 재구성하기 위해 선행연구 [13]에서 제안한 전처리과정을 적용하였다. 그리고 시계열 HRV 신호를 시-주파수영역 분석 기법을 사용하여 마취 단계별 마취심도를 평가할 수 있는 파라미터들을 추출한 후 이들을 이용하여 ANS 영향을 평가하였다. 이와 같은 전체 과정을 흐름도로 나타내면 그림 1과 같다.



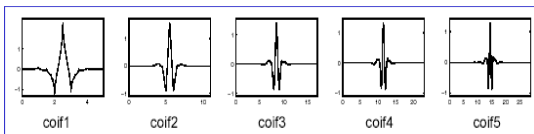
[그림 1] 마취단계별 HRV 신호분석 흐름도

2.5 연구 방법

본 연구에서는 환자의 상태 및 환경에 따라 변화하는 HRV 신호를 시-주파수 영역에서 분석하기 위하여 WT 기법을 이용하여 마취단계별 시계열 HRV 신호를 분석하여 ANS의 영향을 평가하기 위한 파라미터를 추출하였다. 적용된 모 웨이브렛은 시계열 HRV 신호처리에 가장 적합하다고 판단되는 직교 웨이브렛인 Daubechies 3와 Daubechies 10 그리고 Coiflets 1의 웨이브렛 함수를 사용하여 분석하였다. 본 연구에서 적용된 모 웨이브렛으로 시계열 HRV 신호처리에 가장 적합하다고 판단되는 직교 웨이브렛인 Daubechies 3와 Daubechies 10 그리고 Coiflets 1의 웨이브렛 함수를 사용하여 분석하였다. Daubechies 웨이브렛과 Coiflets 웨이브렛의 여러 종류들을 그림 2와 그림 3에 나타내었다. Daubechies 10 웨이브렛 함수를 이용하여 HRV 신호를 MRA(multi resolution analysis)를 적용하여 분석한 일례를 나타내면 그림 4와 같다.

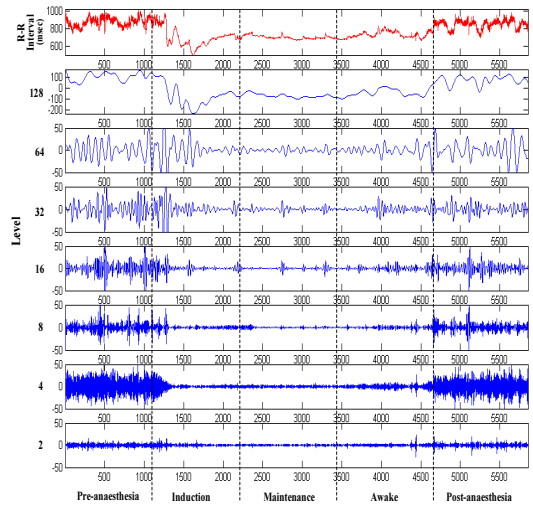


[그림 2] 다양한 Daubechies 웨이브렛의 형태



[그림 3] 다양한 Coiflets 웨이브렛의 형태

그림 4에서 맨 위에 도시된 그래프는 HRV 신호를 나타내며, Level 128은 HRV 신호를 저주파성분인 근사화 (approximation)와 고주파성분인 상세화 (detail) 로 분해할 경우 근사화 신호에 해당된다. 그리고 Level 64 ~ 2는 HRV 신호의 고주파성분을 순차적으로 상세화 과정에 의해 분해한 결과 파형이다. 즉 Level 128은 HRV 신호를 LPF한 신호, Level 64 ~ 2는 HRV 신호를 HPF한 신호를 나타낸다.



[그림 4] HRV 신호의 웨이브렛 변환 결과

HRV 신호의 주파수 대역은 $2/(level \times 0.8)$ 로 계산되었다. 왜냐 하면 성인의 평균 심박동수가 분당 75회이므로 R-R 간격의 평균값은 0.8초로 하였다. 그리고 각 레벨에 따른 주파수 대역을 표 3에 나타내었다

[표 3] 웨이브렛 기법에 의한 HRV 신호의 주파수 대역 구분

Frequency	Level	Frequency range(Hz)
VLF	128	0.0208
	64	0.0417
LF	32	0.0833
	16	0.1667
HF	8	0.3333
	4	0.6667

표 3에서 레벨 2, 4, 8은 HF 성분에 해당되며, 레벨 16, 32는 LF 성분에 해당되고, 그리고 레벨 64와 레벨 128은 VLF에 해당된다. 또한 HRV 신호의 주파수 대역별 PSD를 분석하기 위하여 HF와 LF에 해당되는 각 레벨의 PSD를 적분한 후 LF/HF의 비율을 계산하였다. 그리고 각각의 웨이브렛 함수로부터 구해진 LF, HF, LF/HF의 PSD를 추출하여 파라미터로 활용하였다.

3. 실험결과 및 고찰

본 연구에서는 환자의 마취상태에 따라 변화하는 HRV 신호의 시-주파수 영역에서의 분석을 위하여 웨이브렛 기법을 이용하여 마취단계별 시계열 HRV 신호를

분석하였다. 이를 위하여 전처리과정을 거친 HRV 신호를 마취단계별, 즉 마취 전, 마취유도, 수술 중, 각성, 마취후 등으로 구분하였다. 시계열 HRV 신호처리에 가장 적합하다고 판단되는 직교 웨이브렛인 Daubechies 10, Daubechies 3, 그리고 Coiflets 1 웨이브렛 함수를 사용하여 마취단계별로 LF, HF, LF/HF의 PSD를 분석하였다.

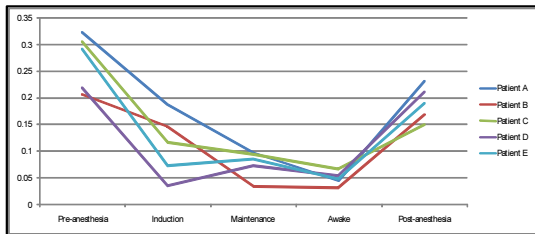
3.1 Daubechies 10 분석 결과

Daubechies 10 웨이브렛 함수를 이용하여 마취단계별 LF, HF, LF/HF의 PSD를 분석한 결과를 표 4에서부터 표 6까지와 그림 5부터 그림 7에 각각 나타내었으며, 분석 결과는 아래와 같다.

먼저, 마취 단계별 LF 대역의 PSD를 살펴보면 다음과 같다.

[표 4] 마취 단계별 5분 동안 db10 웨이브렛 분석에 의한 환자별 LF의 PSD

Stage of anesthesia	Pre-anesthesia	Induction	Maintenance	Awake	Post-anesthesia
Patient A	0.323	0.187	0.097	0.044	0.231
Patient B	0.206	0.146	0.035	0.032	0.169
Patient C	0.305	0.117	0.095	0.067	0.150
Patient D	0.219	0.035	0.073	0.054	0.212
Patient E	0.291	0.073	0.085	0.048	0.189
Mean ±SD	0.270 ±0.053	0.112 ±0.060	0.077 ±0.025	0.049 ±0.013	0.190 ±0.032



[그림 5] 마취 단계별 5분 동안 db10 웨이브렛 분석에 의한 환자별 LF의 PSD

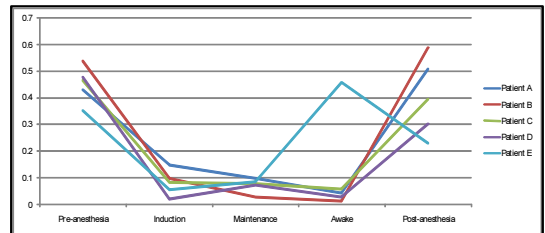
마취 전 단계에서는 0.270 ± 0.053 의 값을 나타내었으나, 마취제 투여가 시작되는 마취유도 단계에서는 0.112 ± 0.060 로 급격하게 감소하는 경향을 나타내었다. 그리고 환자별 변이 양상이 많은 차이를 나타냄을 알 수 있었다. 수술 중 단계에서는 0.077 ± 0.025 로 마취유도 단계보다 더욱 감소하는 경향을 나타내었으나 환자별 변이 양상이 다르게 나타나는 경향을 관찰할 수 있었다. 그리고 각성 단계에서는 0.049 ± 0.013 으로 수술 중 단계보다

감소하는 양상을 보였으며, 마취 후 단계에서는 0.190 ± 0.032 로 다시 급격하게 증가하는 경향을 나타내었다. 따라서 LF 대역의 PSD는 마취 전, 마취유도, 각성 중, 마취 후 단계의 구분에는 활용이 가능한 파라미터라고 판단되나, 수술 중 단계의 구분에는 활용이 다소 무리가 있다고 판단되었다.

다음으로, 마취단계별 HF의 PSD의 변화 양상은 다음과 같다. 마취 전 단계에서는 0.452 ± 0.038 의 값을 나타내었으나, 마취유도 단계는 0.081 ± 0.048 로 급격하게 감소하였다. 수술 중 단계에서는 0.073 ± 0.026 로 마취유도 단계보다 다소 감소하였으나 환자별로 마취유도 단계에서 수술 중 단계로 변화하는 양상이 유의한 변이 양상을 나타내지 않았다.

[표 5] 마취 단계별 5분 동안 db10 웨이브렛 분석에 의한 환자별 HF의 PSD

Stage of Anaesthesia	Pre-anesthesia	Induction	Maintenance	Awake	Post-anesthesia
Patient A	0.429	0.148	0.098	0.042	0.508
Patient B	0.537	0.098	0.029	0.013	0.588
Patient C	0.465	0.083	0.077	0.058	0.394
Patient D	0.478	0.021	0.074	0.028	0.303
Patient E	0.352	0.055	0.085	0.458	0.229
Mean ±SD	0.452 ±0.038	0.081 ±0.048	0.073 ±0.026	0.037 ±0.017	0.405 ±0.146



[그림 6] 마취 단계별 5분 동안 db10 웨이브렛 분석에 의한 환자별 HF의 PSD

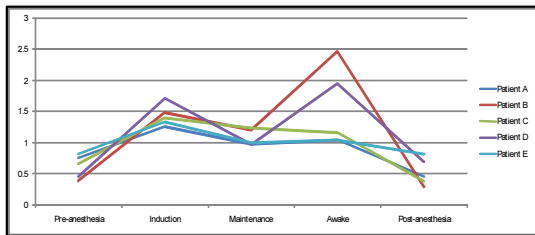
각성단계에서는 0.037 ± 0.017 의 값으로 수술중 보다 약간 감소하였다. 그리고 마취후 단계에서는 0.405 ± 0.146 의 값으로 급격하게 증가하는 양상을 보였다. 따라서 HF의 PSD 파라미터는 마취 전, 마취유도, 각성, 마취 후 단계의 구분에는 활용이 가능한 파라미터라고 판단되나, 수술중 단계의 구분에는 환자별 유의성이 없어 활용이 불가능하리라 판단되었다.

[표 6] 마취 단계별 5분 동안 db10 웨이브렛 분석에 의한 환자별 LF/HF의 PSD

Stage of Anaesthesia	Pre-anesthesia	Induction	Maintenance	Awake	Post-anesthesia
Patient A	0.753	1.262	0.980	1.052	0.456
Patient B	0.384	1.485	1.202	2.464	0.288
Patient C	0.655	1.398	1.234	1.159	0.380
Patient D	0.459	1.716	0.977	1.950	0.700
Patient E	0.827	1.331	0.998	1.047	0.823
Mean ±SD	0.616 ±0.189	1.438 ±0.176	1.078 ±0.128	1.534 ±0.642	0.529 ±0.224

마지막으로, ANS의 균형을 반영하는 지수로서 인식되고 있는 LF/HF의 PSD는 마취 전 단계에서는 0.616 ± 0.189의 값을 나타내었으나 마취유도 단계에서는 1.438 ± 0.176로 급격하게 증가하였다.

수술 중 단계는 1.078 ± 0.128로 마취유도 단계보다 약간 감소하는 경향을 나타내었다.



[그림 7] 마취 단계별 5분 동안 db10 웨이브렛 분석에 의한 환자별 LF/HF의 PSD

각성 단계에서는 1.534 ± 0.642의 값으로 증가하는 양상을 나타내었으나 환자별 변이 양상이 많은 차이를 나타낼 수 있었다. 그리고 마취 후 단계에서는 0.529 ± 0.224의 값으로 급격하게 감소하여 마취 전 단계와 비슷한 값을 나타내었다. 따라서 LF/HF의 PSD 파라미터는 마취 전, 마취유도, 수술 중, 마취 후 단계의 구분에는 활용 가능한 파라미터라고 판단되나, 각성 단계의 구분에는 환자별 유의성이 없어 활용이 불가능하리라 판단된다.

3.2 Daubeches 3 분석 결과

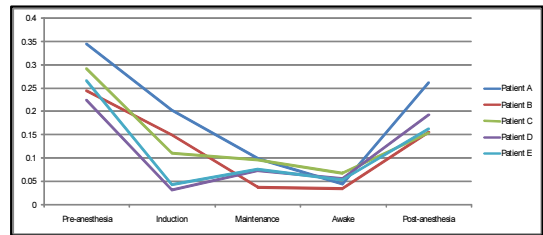
Daubeches 3 웨이브렛 함수를 이용하여 마취 경과에 따른 LF, HF, LF/HF의 PSD를 분석한 결과를 표 7에서부터 표 9까지와 그림 8부터 그림 10에 각각 나타내었다. Daubeches 3를 사용하여 분석 결과는 Daubeches 10을 사용하여 분석한 결과와 비슷한 경향을 나타내었다.

먼저 마취 단계별 LF의 PSD를 살펴보면 다음과 같다.

[표 7] 마취 단계별 5분 동안 db3 웨이브렛 분석에 의한 환자별 LF의 PSD

Stage of Anaesthesia	Pre-anesthesia	Induction	Maintenance	Awake	Post-anesthesia
Patient A	0.344	0.202	0.099	0.045	0.261
Patient B	0.244	0.149	0.037	0.034	0.155
Patient C	0.292	0.111	0.097	0.068	0.154
Patient D	0.224	0.032	0.073	0.057	0.193
Patient E	0.265	0.044	0.077	0.054	0.162
Mean ±SD	0.274 ±0.047	0.108 ±0.071	0.077 ±0.025	0.052 ±0.013	0.185 ±0.045

마취 전 단계에서 0.274±0.047의 값을 나타내었으나, 마취제의 투여가 시작되는 마취유도 단계에서는 0.108±0.071로 급격하게 감소하는 경향을 나타내었으나 환자별 변이 양상이 많은 차이를 나타낼 수 있었다.



[그림 8] 마취 단계별 5분 동안 db3 웨이브렛 분석에 의한 환자별 LF의 PSD

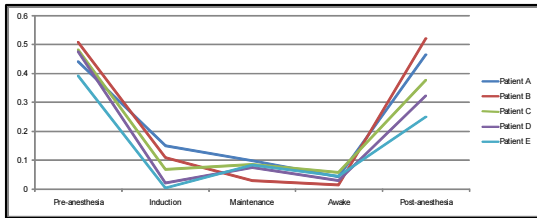
수술 중 단계에서는 0.077±0.025로 마취유도 단계보다 더 감소하는 경향을 나타내었으나 환자별 변이 양상이 다르게 나타나는 경향을 관찰 할 수 있었다. 그리고 각성 단계는 0.052 ± 0.013으로 수술 중 단계보다 감소하는 양상을 보였으며, 마취 후 단계는 0.185 ± 0.045로 급격하게 증가하는 경향을 나타내었다. 따라서 LF의 PSD는 마취 전, 마취유도, 각성 중, 마취 후 단계의 구분에 활용이 가능한 파라미터라고 판단되나, 수술 중 단계의 구분에는 활용이 다소 무리가 있다고 판단되었다.

다음으로, 마취 단계별 HF의 PSD의 변화 양상은 다음과 같다.

[표 8] 마취 단계별 5분 동안 db3 웨이브렛 분석에 의한 환자별 HF의 PSD

Stage of anaesthesia	Pre-anesthesia	Induction	Maintenance	Awake	Post-anesthesia
Patient A	0.441	0.151	0.100	0.043	0.465
Patient B	0.510	0.111	0.030	0.015	0.522
Patient C	0.482	0.070	0.087	0.059	0.377
Patient D	0.476	0.021	0.075	0.029	0.322
Patient E	0.393	0.005	0.085	0.045	0.251
Mean ±SD	0.460 ±0.045	0.071 ±0.061	0.075 ±0.027	0.038 ±0.017	0.387 ±0.109

마취 전 단계에서는 0.460 ± 0.045 의 값을 나타내었으나, 마취유도 단계는 0.071 ± 0.061 로 급격하게 감소하였다. 수술 중 단계에서는 0.075 ± 0.027 로 마취유도 단계보다 다소 감소하였으나 환자별로 마취유도 단계에서 수술 중 단계로 변화하는 양상이 유의한 변이 양상을 나타내지 않았다.



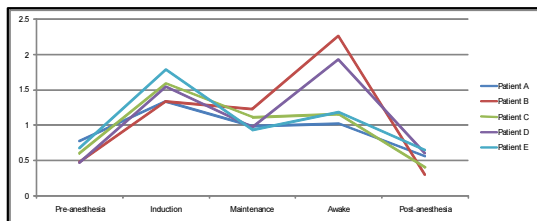
[그림 9] 마취 단계별 5분 동안 db3 웨이브렛 분석에 의한 환자별 HF의 PSD

각성 단계는 0.038 ± 0.017 의 값으로 수술중 보다 약간 감소하였다. 그리고 마취 후 단계에서는 0.387 ± 0.109 의 값으로 다시 급격하게 증가하는 양상을 보였다. 따라서 HF의 PSD 파라미터는 마취 전, 마취유도, 각성, 마취 후 단계의 구분에는 활용이 가능한 파라미터이나 수술 중 단계의 구분에는 환자별 유의성이 없어 활용이 불가능하리라 판단되었다.

마지막으로, ANS의 균형을 반영하는 지수로서 LF/HF의 PSD는 마취 전 단계에서는 0.601 ± 0.132 의 값을 나타내었으나, 마취유도단계는 1.510 ± 0.180 로 급격하게 증가하였다.

[표 9] 마취 단계별 5분 동안 db3 웨이브렛 분석에 의한 환자별 LF/HF의 PSD

Stage of anesthesia	Pre-anesthesia	Induction	Maintenance	Awake	Post-anesthesia
Patient A	0.779	1.340	0.990	1.026	0.561
Patient B	0.478	1.343	1.232	2.263	0.298
Patient C	0.605	1.586	1.117	1.157	0.408
Patient D	0.470	1.543	0.971	1.931	0.600
Patient E	0.674	1.790	0.938	1.189	0.647
Mean \pm SD	0.601 ± 0.132	1.510 ± 0.18	1.050 ± 0.122	1.520 ± 0.543	0.503 ± 0.146



[그림 10] 마취 단계별 5분 동안 db3 웨이브렛 분석에 의한 환자별 LF/HF의 PSD

수술 중 단계는 1.050 ± 0.122 로 마취유도 단계보다 약간 감소하는 양상을 나타내었다. 각성 단계에서는 1.520 ± 0.543 의 값으로 증가하는 양상을 나타내었으나 환자별 변이 양상이 많은 차이를 나타냄을 관찰할 수 있었다. 그리고 마취 후 단계에서는 0.503 ± 0.146 의 값으로 급격하게 감소하여 마취 전 단계와 비슷한 값을 나타내었다. 따라서 LF/HF의 PSD 파라미터는 마취 전, 마취유도, 수술 중, 마취 후 단계의 구분에는 활용이 가능한 파라미터이나, 각성 단계의 구분에는 환자별 유의성이 없어 활용이 불가능하리라 판단되었다.

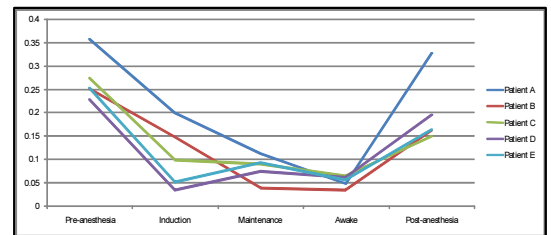
3.3 Coiflets 1 분석 결과

Coiflets 1 웨이브렛 함수를 이용하여 마취 경과에 따른 LF, HF, LF/HF의 PSD를 분석한 결과를 표 10에서부터 표 12까지와 그림 11부터 그림 13에 각각 나타내었다. 그리고 Coiflets 1의 분석 결과는 Daubeches 10, Daubeches 3를 사용하여 분석한 결과와 유사한 경향을 나타내었다.

먼저, 마취단계별 LF의 PSD를 살펴보면 다음과 같다.

[표 10] 마취 단계별 5분 동안 coif1 웨이브렛 분석에 의한 환자별 LF의 PSD

Stage of anesthesia	Pre-anesthesia	Induction	Maintenance	Awake	Post-anesthesia
Patient A	0.358	0.200	0.112	0.047	0.328
Patient B	0.251	0.147	0.039	0.034	0.162
Patient C	0.274	0.100	0.091	0.065	0.149
Patient D	0.228	0.034	0.074	0.061	0.195
Patient E	0.252	0.052	0.093	0.056	0.163
Mean \pm SD	0.273 ± 0.050	0.107 ± 0.068	0.082 ± 0.027	0.053 ± 0.012	0.200 ± 0.074



[그림 11] 마취 단계별 5분 동안 coif1 웨이브렛 분석에 의한 환자별 LF의 PSD

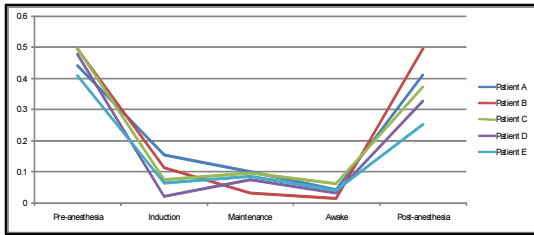
마취 전 단계에서 0.273 ± 0.050 의 값을 나타내었으나, 마취제 투여가 시작되는 마취유도 단계에서는 0.107 ± 0.068 로 감소하는 경향을 나타내었다. 그리고 환자별 변이 양상이 많은 차이를 나타냄을 알 수 있었다. 수술 중 단계에서는 0.082 ± 0.027 로 마취유도 단계보다 더

속 감소하는 경향을 나타내었으나 환자별 변이 양상이 다르게 나타나는 경향을 보였다. 그리고 각성단계는 0.053 ± 0.012 으로 수술 중 단계보다 감소하는 양상을 보였으며, 마취 후 단계는 0.200 ± 0.074 의 값으로 다시 급격하게 증가하는 경향을 나타내었다. 따라서 LF의 PSD는 마취 전, 마취유도, 각성 중, 마취 후 단계의 구분에 활용이 가능한 파라미터라고 판단되나, 수술 중 단계의 구분에는 활용이 다소 무리가 있다고 판단되었다.

다음으로, 마취 단계별 HF의 PSD의 변화 양상은 다음과 같다.

[표 11] 마취 단계별 5분 동안 coif1 웨이브렛 분석에 의한 환자별 HF의 PSD

Stage of anesthesia	Pre-anesthesia	Induction	Maintenance	Awake	Post-anesthesia
Patient A	0.442	0.155	0.101	0.043	0.412
Patient B	0.495	0.114	0.032	0.015	0.496
Patient C	0.497	0.076	0.097	0.063	0.372
Patient D	0.479	0.022	0.076	0.032	0.328
Patient E	0.409	0.065	0.087	0.041	0.252
Mean \pm SD	0.464 ± 0.038	0.086 ± 0.050	0.079 ± 0.028	0.039 ± 0.017	0.370 ± 0.092



[그림 12] 마취 단계별 5분 동안 coif1 웨이브렛 분석에 의한 환자별 HF의 PSD

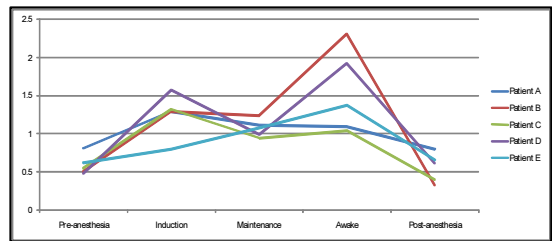
마취 전 단계에서 0.464 ± 0.038 의 값을 나타내었으나, 마취유도단계는 0.086 ± 0.050 로 급격하게 감소하였다. 수술 중 단계에서는 0.079 ± 0.028 로 마취유도 단계보다 다소 감소하였으나 환자별로 마취유도 단계에서 수술 중 단계로 변화하는 양상이 유의한 변이양상을 나타내지 않았다. 각성단계에서는 0.039 ± 0.017 의 값으로 수술 중보다 약간 감소하였다. 그리고 마취 후 단계에서는 0.370 ± 0.092 의 값으로 급격하게 증가하는 양상을 보였다. 따라서 HF의 PSD 파라미터는 마취 전, 마취유도, 각성, 마취 후 단계의 구분에는 활용이 가능한 파라미터라고 판단되나 수술 중 단계의 구분에는 환자별 유의성이 없어 활용이 불가능하리라 판단되었다.

마지막으로 ANS의 균형을 반영하는 지수인 LF/HF의 PSD는 마취 전 단계에서는 0.593 ± 0.133 의 값을 나타내었으나 마취유도단계에서는 1.257 ± 0.283 로 급격하게

증가하였다.

[표 12] 마취 단계별 5분 동안 coif1 웨이브렛 분석에 의한 환자별 LF/HF의 PSD

Stage of anesthesia	Pre-anesthesia	Induction	Maintenance	Awake	Post-anesthesia
Patient A	0.811	1.297	1.112	1.096	0.799
Patient B	0.508	1.298	1.241	2.306	0.327
Patient C	0.552	1.321	0.944	1.041	0.400
Patient D	0.477	1.573	0.991	1.923	0.613
Patient E	0.617	0.795	1.072	1.373	0.649
Mean \pm SD	0.593 ± 0.133	1.257 ± 0.283	1.072 ± 0.115	1.548 ± 0.549	0.558 ± 0.192



[그림 13] 마취 단계별 5분 동안 coif1 웨이브렛 분석에 의한 환자별 LF/HF의 PSD

수술 중 단계는 1.072 ± 0.115 로 마취유도 단계보다 약간 감소하는 경향을 나타내었으나 환자별 변이 양상이 다르게 나타나 유의성을 발견하기 힘들었다. 각성단계는 1.548 ± 0.549 의 값으로 증가하는 양상을 나타내었으나 환자별 변이 양상이 많은 차이를 나타냄을 관찰할 수 있었다. 그리고 마취 후 단계에서는 0.558 ± 0.192 의 값으로 급격하게 감소하여 마취 전 단계와 비슷한 값을 나타내었다. 따라서 LF/HF의 PSD 파라미터는 마취 전, 마취유도, 마취 후 단계의 구분에는 활용 가능한 파라미터라고 판단되나, 수술중과 각성단계의 구분에는 환자별 유의성이 없어 활용이 불가능하리라 판단되었다.

4. 결론

마취상태 하의 환자감시는 환자의 생리학적 변수를 여러 가지 감시 장치를 통하여 측정함으로써 적절한 마취심도를 유지함으로써 통증을 동반한 각성과 의료사고 등을 미연에 방지하여 불유쾌한 경험을 하지 않고 수술을 받을 수 있게 한다. 이러한 마취심도의 객관적인 측정을 위한 연구가 이루어지고 있으나 정확한 마취심도 평가 기준은 제시되지 못하고 있다. 이에 본 연구에서는 마취 경과에 따른 수술환자의 심박동변이율 신호를 분석함

로서 마취단계별 마취심도를 평가하기 위한 파라미터를 개발하는 연구를 수행하였다. 이를 위하여 심박동변이율 신호를 이용하여 시-주파수영역에서 분석하여 마취 단계별 마취심도를 평가할 수 있는 특징 파라미터들을 추출하고자 하였다[14],[15].

심박동변이율 신호를 이용하여 보다 객관적으로 마취심도를 평가하기 위하여 웨이브렛 변환 분석 기법을 적용하였다. 웨이브렛 변환 기법의 적용을 위하여 고속 푸리에 변환과 연속 및 이산 웨이브렛 그리고 웨이브렛 변환을 이용하였다.

마취심도를 평가할 수 있는 특징 파라미터들을 추출하기 위해서 필수적인 마취 시술환자의 심전도 신호의 측정을 위하여 부산대학교 병원 산부인과에서 엔플루란 흡입 마취제로 전신마취 시술을 받는 5명의 환자로부터 사전 동의를 얻은 후 마취 경과에 따른 심전도 신호를 획득하였다. 심전도 신호의 획득을 위하여 심전도 사지유도법인 lead 1을 사용하였고, PhysioLab 400 생체신호계측기를 이용하여 신호를 측정하였다. 측정된 심전도 신호로부터 심박동변이율 신호를 재구성하였으며, 마취심도를 평가하기 위하여 마취 단계를 마취 전, 마취유도, 수술 중, 각성, 그리고 마취 후 단계 등으로 구분하여 분석에 활용하였다. 이를 위해 각 마취 단계별로 5분 동안의 심전도 신호를 획득하여 전처리 과정을 거쳐 시계열 심박동변이율 신호를 재구성하였다. 전처리 과정을 수행하기 위하여 끝점매칭, 평균 감산, 평준화 기법 등을 적용하였다. 그리고 전처리 과정을 거친 시계열 HRV 신호로부터 마취 단계별 마취심도를 분석할 수 있는 특징 파라미터를 추출하기 위하여 웨이브렛 변환 분석 기법을 적용하였다. 추출된 특징 파라미터를 분석한 결과는 다음과 같다.

웨이브렛 변환에 의한 분석을 위하여 Daubechies 10, Daubechies 3, Coiflets 1 웨이브렛 함수를 이용하여 LF, HF, 그리고 LF/HF의 PSD 파라미터를 추출하여 분석한 결과 마취가 진행되어감에 따라 LF와 HF의 PSD 파라미터 값이 감소하는 경향을 관찰할 수 있었다. 이러한 현상은 마취제의 투여로 인한 교감 및 부교감신경계의 활성화도 감소에 의한 현상으로 사료된다. 그리고 자율신경계의 균형을 반영하는 LF/HF의 PSD 파라미터의 분석 결과 마취가 진행됨에 따라 증가하는 양상을 나타내었다. 이러한 현상은 교감신경계의 활성화도가 상대적으로 높아진 현상으로 생각된다. 세 종류의 웨이브렛 함수를 적용한 PSD 분석 결과 마취 단계에 따라 모두 비슷한 양상을 나타내었으나, 이들 중 Daubechies 10의 실험 결과가 보다 양호하게 관측되어 마취 단계별 마취심도를 평가할 수 있는 특징 파라미터로서 가장 적절하다는 판단하였다.

본 연구 결과 심박동변이율 신호를 이용하여 마취 단

계별 마취심도 평가의 가능성을 확인하였다. 그리고 현재 임상에 적용되는 의사의 주관적인 마취심도 판단을 보다 객관화하고 정량화된 수치를 마취의사에게 제공함으로써 적절한 마취약제의 사용이 가능하고 마취 시술환자의 빠른 회복을 기대할 수 있을 뿐만 아니라 마취로 인한 불의의 의료사고를 미연에 방지할 수 있으리라 판단된다. 그러나 수술환자의 마취상태를 보다 정확하게 분석하기 위해서는 파라미터의 정확성을 높일 수 있는 분석 알고리즘에 관한 연구, 파라미터의 유용성 검증을 위한 통계처리 방법 그리고 파라미터의 정량화에 의한 마취심도의 정량화에 관한 연구 등을 지속적으로 수행할 필요성이 있으며, 자율신경계를 반영하는 HRV 신호뿐만 아니라 중추신경계를 반영하는 뇌파 신호를 동시 분석함으로써 보다 정확한 마취심도의 감시가 가능하리라 사료된다.

이러한 연구가 본 연구의 기반 하에 지속적으로 수행이 된다면 실시간 마취심도의 감시가 가능한 시스템의 개발이 가능하리라 판단되며, 차세대 성장산업으로 주목받고 있는 미래 의료기기 산업의 발전에도 지대한 공헌을 하리라 생각된다.

참고문헌

- [1] James V. F, Frederick. E. D., David M.H., Jonathan M. and Victor F. F, "Autonomic Nervous System Interaction with the cardiovascular system During Exercise", Progress in Cardiovascular Diseases, vol. 48, no.5, pp.342-362, 2006.
- [2] D. Ramaekers, H. ector, A.E augert, A. Rubens and F. van de Werf, "Heart rate variability and heart rate in healthy volunteers", European Heart Journal, vol. 19, pp. 1334-1341, 1998.
- [3] H.-H. Huang, H.-L. Chan, P.-L. Lin, C.-P. Wuand C.-H. Huang, "Time- frequency spectral analysis of heart rate variability during induction of general anaesthesia", British Journal of Anaesthesia, Vol.79, pp.754-758, 1997.
- [4] Makoto Kato, M.D., Toru Komatsu, M.D., Tomomasa Kimura, M.D., Fumihiko Sugiyama, M.D, Koichi Nakashima, M.D., Yasuhiro Shimada, M.D., "Spectral Analysis Heart Rate Variability during Isoflurane Anesthesia", Anesthesiology, vol.77, pp.669-674, 1992.
- [5] V. Pichot, S. Buffiere, J.-M. Gazpoz, F.Costes, S.Moliex, and J.-C. Barthelemy, "Wavelet transform of heart rate variability to assess autonomic nervous system activity does not predict arousal from general

anesthesia", Can J. Anesth, vol.48, no.9, pp.859-863, 2001.

[6] Pichot V, Gaspoz J-M, Molliex S, et al, "Wavelet transform to quantify heart rate variability and to assess its instantaneous changes", J Appl Physiol. vol.86, pp.1081-91, 1999.

[7] Stanski DR "Monitoring depth of anesthesia. In Miller RD(eds)", Anesthesia. Philadelphia, Churchill Livingstone, pp.85-102, 1990.

[8] Ghoneim, MM, Block RI, "Learning and Memory during general anestheisa", Aneshtesiology, vol. 87, pp.387-410, 1997.

[9] Jones JG, "Perception and memory during general anesthesia", Br J Anesth, vol. 73, pp. 31-7, 1994.

[10] Elina S., Arvi Y.H., Emmanuel C.L., Kari K. "Analgesia, Hypnosis and movement responses during uterine dilatation and curettage", American society of anesthesiologists annual meeting, A-71, 2001.

[11] N. Ireland, J.Meagher, J.W.Sleigh and J. D. Henderson, "Heart rate variability patients recovering from general anaesthesia", British Jounal Anaesthesia, vol.76, pp.657-662, 1996.

[12] Thornhill, N.F. "Finding the source of nonlinearity in a process with plant-wide oscillation", IEEE Transaction on Control Systems Technology, vol. 13, Issue 3, May, pp. 434 - 443, 2005.

[13] Shoukat M. A. A. Choudhury, Sirish L. Shah and Nina F. Thornhill. "Diagnosis of Process Nonlinearities and Valve Stiction ", Springer Berlin Heidelberg, 2008

전 계 록(Gye-Rok Jeon)

[정회원]



- 1981년 2월 : 부산대학교 대학원 전자공학과 (공학석사)
- 1993년 2월 : 동아대학교 대학원 전자공학과 (공학박사)
- 1985년 3월 ~ 현재 : 부산대학교 의학전문대학원 교수

<관심분야>

의용계측, 영상신호처리, 생체시스템 모델링

김 명 철(Myung-Chul Kim)

[준회원]



- 2008년 2월 : 동서대학교 전자공학(공학학사)
- 2008년 3월 ~ 현재 : 부산대학교 의공학 협동과정 석사과정

<관심분야>

생체계측, 의공학

한 봉 효(Bong-Hyo Han)

[준회원]



- 2002년 2월 : 동서대학교 전자공학 학사
- 2004년 2월 : 부산대학교 의공학 협동과정 공학석사

<관심분야>

신호처리, 생체계측, 의공학

예 수 영(Soo Young Ye)

[정회원]



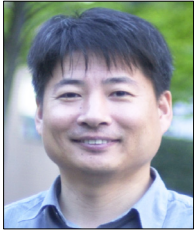
- 1998년 2월 : 부산대학교 전자공학 (공학석사)
- 2004년 2월 : 부산대학교 의공학 협동 과정 (공학박사)
- 2006년 10월 ~ 현재 : 부산대학교 의학전문 대학원 BK21 고급 의료인력양성사업단 연구교수

<관심분야>

신호처리, 생체계측, 의공학

노 정 훈(Jung Hoon Ro)

[정회원]



- 1986년 2월 : 부산대학교 대학원 물리학과 (이학석사)
- 2001년 2월 : 부산대학교 대학원 물리학과(이학박사)
- 2003년 3월 ~ 현재 : 부산대학교 의학전문대학원 조교수

<관심분야>

의용 광학, 계측 센서 시스템, 레이저 응용

백 승 완(Seong-Wan Baik)

[정회원]



- 1979년 3월 ~ 1981년 8월 : 부산대학교 대학원 의학전공 석사
- 1987년 3월 ~ 1990년 2월 : 충남대학교 대학원 의학전공 박사
- 2004년 9월 ~ 2005년 2월 : 부산대학교 경영대학원 최고경영자과정 수료
- 2005년 9월 ~ 2006년 2월 : 부산대학교 의학전문대학원 의료 최고경영자과정 수료
- ~ 현재 : 부산대학교 의학전문대학원 마취통증의학과 교수, 양산부산대학교병원 병원장

<관심분야> 마취 통증 의학, 의공학