

바이스펙트럼 분석 기반의 뇌파 Artifact 제거 프로세스 구현

박준모*

동명대학교 전자및의용공학부

Implementation of EEG Artifact Removal Process Based on Bispectrum Analysis

Junmo Park*

School of Electronic and Biomedical Engineering, Tongmyong University

요 약 본 연구에서는 뇌파의 스펙트럼 분석에 의해 추출되는 마취심도 지표인 SEF(spectral edge frequency), MF(median frequency)의 가변성 감소를 위하여 뇌파의 비선형성에 근거하여 바이스펙트럼 분석기법을 도입하고자 한다. 수술환경에서 뇌파의 계측과 분석은 다양한 외부 아티팩트 요소를 감안하여야 한다. 바이스펙트럼 분석은 비선형적 신호의 특성을 추출하는 분석 방법으로 외부 유입 아티팩트의 유무를 확인 할 수 있어 뇌파에 인입되어 분석에 영향을 끼치는 아티팩트를 효과적으로 제거하는데 기여한다. 이러한 과정을 통해 SEF, MF와 같은 마취심도 파라미터의 실시간 가변성을 감소시킬 수 있었다. 이러한 가변성 감소는 수술현장에서 실시간 활용 가능한 임상 지표서 SEF, MF의 유용성을 제고시켜 줄 수 있을 것이다.

• 주제어 : 마취심도, 뇌파, 바이스펙트럼, SEF, MF

Abstract In this study, bispectrum analysis method introduced to reduce variability of SEF(spectral edge frequency) and MF(median frequency), which are the anesthetic depth indexes extracted by EEG spectral analysis. Bispectrum analysis is an analytical method that can confirm the nonlinearity of EEG. Signal measurement and analysis in the surgical environment should take into consideration various external artifact factors. Bispectrum analysis can confirm the presence of externally introduced artifacts, thereby effectively eliminating artifacts that affect the EEG signal. By applying bispectrum parameters, real-time variability of the anesthetic depth parameters SEF, MF could be reduced. Elimination of variability makes it possible to use SEF, MF as a real-time index during surgery

• Key Words : Anesthetic depth, EEG, Bispectrum, SEF, MF

Received 14 June 2019, Revised 28 June 2019, Accepted 29 June 2019

* **Corresponding Author** Junmo Park, School of Electronic and Biomedical Engineering, Tongmyong University, 428, Sinseon-ro, Nam-gu, Busan, Korea. E-mail : jmpark@tu.ac.kr

I. 서론

외과수술은 절개와 같은 강한 자극을 수반하고 있기 때문에 환자의 무의식, 무감각, 무통증, 근육이완, 반사의 억제 등 마취시술을 구성하고 있는 요소들 적절히 통제할 수 있어야만 한다[1-2]. 일반적으로 임상에서는 의식의 유무를 마취의 적절성을 확인하고 있으며 그중 대표적인 방법은 임상의의 구두 명령에 대하여 환자의 응답 유무나 눈꺼풀 반사 정도와 같은 비정량적 기준이 일반적으로 사용되고 있다[3]. 마취의 적절성을 나타내는 표현 중 하나인 진정심도(depth of sedation)는 의식 수준을 최소한으로 억제하면서, 환자 스스로 기도를 지속적으로 유지할 수 있고 육체적 자극과 구두 명령에 적절하게 반응할 수 있는 상태를 의미한다.[3] 안전한 수술을 위해서는 적당한 마취심도를 유지하여야 하는데 이것은 마취 시술이 완료된 후 진행된 수술에서 적절한 의식의 소실이 이루어지지 않아 수술 중에 통증이 동반되는 회상(conscious awareness)이나 통증을 동반하지 않은 회상이 발생할 수 있고, 의식이 없는 인지(perception) 상태가 발생할 수도 있다[4-5]. 마취심도의 관리는 수술이 진행되는 동안에 환자가 불쾌한 경험의 회상을 경험하지 않도록 하기 위해 매우 중요한 요소로 다루어지고 있다. 이에 따라 마취심도를 적절히 관리하기 위한 객관적 기준의 설정에 대한 다양한 기법에 관한 많은 노력과 연구가 수행되고 있다[6]. 이와 관련하여 뇌파(EEG, Electroencephalograph)는 뇌의 기능적인 변화를 관찰하는 도구로서 인체(두피)로부터 electric potential을 검출하여 얻게 되는 신호로 마취에 의한 중추신경계의 억제 정도를 평가하는 도구로 사용되고 있다[7-9].

뇌파(EEG)의 분석에는 스펙트럼 분석을 기반으로 한 SEF(spectral edge frequency), MF(median frequency), 청각유발 전위 지수(auditory evoked potential index), BIS(bispectral index)등의 지표가 개발되어 임상에서 사용되고 있다. 최근에는 고차 스펙트럼(bispectrum) 분석과 같은 비선형분석 기법을 통해 수술 중 발생하는 다양한 Artifact를 제거하여 보다 신뢰성 높은 마취심도 평가지표 추출을 위한 연구가 다양하게 이루어지고 있다[9-11].

본 연구에서는 비선형 분석기법인 바이스펙트럼 분석을 통해 뇌파에 포함된 Artifact 요소를 추출하고, 이를 활용하여 마취 수준을 잘 반영한다고 알려진 SEF와

MF 추출에 반영하여 비선형 바이스펙트럼 분석에 의한 SEF와 MF의 유용성 제고 가능성을 확인하고자 한다. 이를 위해 II장에서는 연구에 적용된 이론에 대해 기술하고, III장에서는 연구에 적용된 이론에 대하여 기술한다. IV장에서 연구를 통해 얻어진 결과를 분석하여 V장에서 결론을 맺는다.

II. 본론

2.1 신호의 계측 및 전처리

뇌파 신호의 전처리 과정에서는 생체신호계측기 PhysioLab 400에서 제공하는 필터 기능을 선택하여 잡음을 필터링하였으며, 필터의 설정은 1Hz의 차단 주파수를 갖는 HPF, 35 Hz의 차단 주파수를 갖는 LPF, 그리고 60 Hz의 차단주파수를 갖는 노치필터를 적용하였다. 필터의 설정 및 적용에 의하여 잡음을 최소화하더라도 여전히 뇌파 신호에는 계측이 진행되는 동안 발생하는 온도 변화, 정적 전위(static potential)에 의해 발생하는 전기적 오프셋(offset)이 존재하며 이를 제거하기 위해 다음의 식을 이용한다.

$$X = \frac{1}{N} \sum_{i=0}^{N-1} X_i \quad (1)$$

$$X'_i = X_i - X \quad (2)$$

여기서, X 는 일정 구간 뇌파 신호의 평균이고, X_i 는 측정된 뇌파 신호의 크기, 그리고 X'_i 는 기저선 효과를 보정한 뇌파 신호이다.

2.2 뇌파의 스펙트럼 분석

푸리에분석(fourier analysis)은 시계열 데이터의 주파수 영역 변환을 통해 주파수 구성요소의 변화를 추출하는 분석기법으로 식 (3)과 같이 나타낼 수 있다. 이를 이용해 시계열 신호의 변화를 추출하는 수학적 기법으로서 뇌파 신호처리 분야에 많이 사용되는 분석 기법이다.

$$F(jw) = \int_{-\infty}^{\infty} f(t)e^{-jwt} dt \quad (3)$$

뇌파 신호 중 마취심도의 평가에 유용한 주파수 대역은 1-35Hz의 범위에 있으며 임상에서는 이 주파수 대역의 신호들을 대상으로 뇌파의 파워스펙트럼밀도

(PSD, power spectrum density)를 추출하고, 이를 가공하여 마취심도의 평가에 유용한 파라미터들을 추출하고자 한다. 임상에서 사용되고 있는 마취심도 파라미터들은 뇌의 상태가 안정, 수면 상태에 있을 때 서파화(3~5Hz)되고 뇌의 활동이 원활할 때 속파(8~31Hz) 영역의 신호가 많이 출현한다는 특징을 이용하여 만들어진 파라미터들로 이 중 대표적으로 폭 넓게 임상에서 활용되고 있는 95% SEF(Spectral Edge Frequency)와 MF(Median Frequency) 파라미터가 있다.

$$95\% SEF > \frac{TP}{100} \times 95 \quad (4)$$

$$MF > \frac{TP}{100} \times 50 \quad (5)$$

여기서, TP는 전체 파워의 크기를 말하여, 95% SEF는 전체 파워의 95%가 되는 지점의 주파수를 의미하며, MF는 전체 파워의 50%가 되는 주파수를 의미한다.

2.3 뇌파의 바이스펙트럼 분석

어떤 특정한 신호에 대한 통계적 특성을 분석하는데 주로 사용되는 고차 스펙트럼은 통계적 신호(stochastic signals)의 다차(multiple) 푸리에변환으로서, 큐물런트(cumulant)와 큐물런트의 스펙트럼에 의해 정의될 수 있다. 이러한 고차 스펙트럼의 일례로 바이스펙트럼을 들 수 있다. X(t)가 정현파(stationary wave) 입력 신호인 경우 k차 큐물런트는 다음과 같이 정의될 수 있다.

$$C_k(\tau_1, \dots, \tau_{k-1}) = E[x(t)x(t+\tau_1)\dots x(t+\tau_{k-1})] \quad (6)$$

여기서, $\tau_1, \dots, \tau_{k-1}$ 는 시간지연(time lag)이며, $E[\]$ 는 기대치를 의미한다. 큐물런트와 유사한 방법으로 k차 모멘트(moments)는 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$m_k(\tau_1, \dots, \tau_{k-1}) = E[x(t)x(t+\tau_1)\dots x(t+\tau_{k-1})] \quad (7)$$

여기서, $\{x(t)\}$, $t = 0, \pm 1, \pm 2, \dots$ 의 평균값은 0 즉, $E[x(t)]=0$ 이다. 그리고 정상 상태를 유지하는 실수

값을 갖는 랜덤 프로세스라고 가정하면, 큐물런트와 모멘트의 2차 관계는 식 (8)와 같이 나타낼 수 있으며, 3차 관계는 식 (8)과 같이 나타낼 수 있다.

$$E[x(t)x(t+\tau_1)] = m_2(\tau_1) = c_2(\tau_1) \quad (8)$$

$$E[x(t)x(t+\tau_1)x(t+\tau_2)] = m_3(\tau_1, \tau_2) = c_3(\tau_1, \tau_2) \quad (9)$$

식 (8)은 동일 신호의 시간 지연에 따른 상관값을 나타내는 자기상관 시퀀스(autocorrelation sequence)라 한다. 그리고 식 (9)는 같은 신호에 2개의 시간 지연에 대한 모멘트를 나타내며, 이를 3차 모멘트(third-order moment) 또는 큐물런트 시퀀스라고 한다.

$\{x(t)\}$ 인 프로세스에 대하여 N차 스펙트럼 $C(\omega_1, \omega_2, \dots, \omega_{N-1})$ 은 N차 큐물런트 시퀀스 $c_N(\tau_1, \tau_2, \dots, \tau_{N-1})$ 의 다차 푸리에변환으로 정의할 수 있고 다음의 수식으로 나타낼 수 있다.

$$C(\omega_1, \dots, \omega_{N-1}) = \quad (10)$$

$$\sum_{\tau_1=-\infty}^{\infty} \dots \sum_{\tau_{N-1}=-\infty}^{\infty} c_N(\tau_1, \dots, \tau_{N-1}) \cdot e^{-j(\omega_1\tau_1 + \dots + \omega_{N-1}\tau_{N-1})}$$

여기서, N은 차수를 의미하며, N = 2인 경우를 파워 스펙트럼이라 하고, N = 3인 경우를 바이스펙트럼이라 하며, 각각을 수식으로 표현하면 다음과 같다.

$$P(\omega) \cong C(\omega_1) = \sum_{\tau_1=-\infty}^{\infty} c_2(\tau_1) e^{-j\omega_1\tau_1} \quad (11)$$

$$B(\omega_1, \omega_2) \cong C(\omega_1, \omega_2) = \sum_{\tau_1=-\infty}^{\infty} \sum_{\tau_2=-\infty}^{\infty} c_3(\tau_1, \tau_2) e^{-j(\omega_1\tau_1 + \omega_2\tau_2)} \quad (12)$$

뇌파는 생리학적으로 수십억 개의 뉴런이 연결되어 있는 비선형적 구조를 가지고 있어 선형분석법인 스펙트럼분석 하나의 주파수가 다른 또 하나의 주파수와 관련되어 새로운 제3의 주파수를 만드는 계의 특성을 반영한다. 또한 독립적인 두 주파수의 관련성에 의해 발생된 신호의 크기에 관한 정보뿐만 아니라 위상에 관한 정보도 포함함으로써 뇌파 신호로부터 파워스펙트럼에 표시되는 주파수 성분들 간의 관련성을 찾을 수 있다. 예를 들어 특정한 상황에서 뇌 시스템 내부 신경 뉴런그룹 사이의 연결성(coupling coefficient)이 강해지면 새로운 주파수 성분을 지닌 전기신호를 발생

및 전달시키게 된다. 이때 바이스펙트럼 피크 값의 출현 양상을 분석함으로써 주요 주파수를 지니는 신경뉴런들의 연결성을 평가할 수 있으며, 이를 이용하여 마취심도의 평가가 가능하다.

2.4 뇌파의 Artifact

뇌파 신호는 크기가 다른 생체신호에 비해 크기가 작아(100 μ V 이하) 작은 잡음원에도 민감하게 영향을 받는다. 실제 수술 환경에서 측정된 원신호(raw signal)에는 절개, 전기수술기 사용, 환자의 흔들림, 근육 떨림, 전극의 유동 등과 같은 다양한 아티팩트(artifact)에 의해 왜곡되어 계측된다. Fig. 1은 아티팩트가 포함되지 않은 정상 뇌파이다.

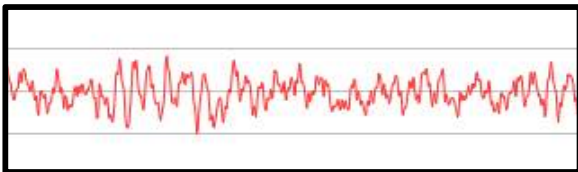


Fig. 1. Normal EEG Signal without artifacts

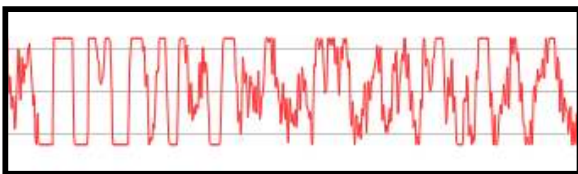


Fig. 2. EEG signal with Artifact by Electrosurgical Unit

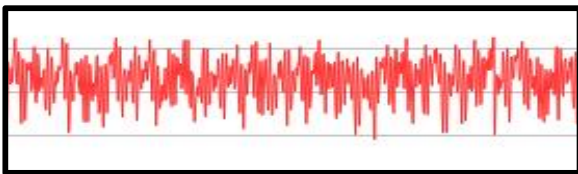


Fig. 3. EEG signal with Artifact by defective electrode contact

Fig. 2는 수술 중 전기수술기 사용에 의한 아티팩트로 뇌파가 입력 범위 한계치로 포화되어 버린 뇌파이다. Fig. 3은 전극이 적절하게 부착되지 않았거나 수술 중 환자와의 접촉 불량으로 인한 아티팩트에 의해 왜곡된 뇌파를 보여주고 있다. 이러한 아티팩트의 제거는 뇌파분석의 신뢰도를 높이기 위해 반드시 적절한 기법이 선택되어 적용되어야 한다.

III. 실험 방법

계측 대상 환자군의 선정은 America Social Anaesthesia 신체 분류 등급 기준에 따라 ASA 1등급(건강한 환자), ASA 2등급(경한 전신 질환, 기능 제한은 없음)을 대상으로 하였으며 데이터 계측은 마취 약제 투입 전 각성 상태에서부터 계측을 시작하여 마취 상태(수술 중), 수술 후 각성 상태 도달까지 연속 계측하여 각성-마취-각성의 3단계 상태를 모두 포함하도록 하였다. 전극은 은/염화은 전극을 사용하였으며, 전극을 효과적으로 부착하기 위하여 접착식 패치 형태의 일회용 전극을 사용하였다.

Table 1. Classification of the body status Applied to ASA Criterion (ASA score - American Society of Anesthesiologists, 1963)

Class	Description
ASA1	A normal healthy patient.
ASA2	A patient with mild systemic disease.
ASA3	A patient with severe systemic disease.
ASA4	A patient with severe systemic disease that is a constant threat to life
ASA5	A moribund patient who is not expected to survive without the operation
ASA6	A declared brain-dead patient whose organs are being removed for donor purpose

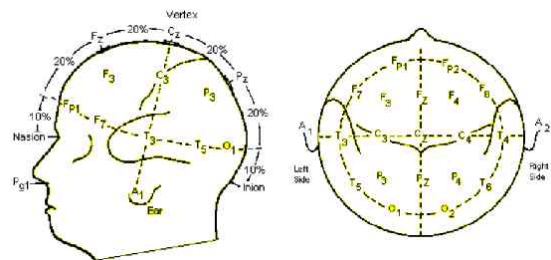


Fig. 4. Electrode attachment diagram using ten-twenty method

전극의 배치는 국제 뇌파 및 임상 뇌 대사 학회 연맹(International Federation of Societies for Electroencephalograph and Clinical Neurophysiology)에서 추천한 10-20 전극 배치법에 따라 실제 계측 전극은 전두엽 FP1 전극, Gnd 전극, 귓볼의 Reference 전극 등 3개 지점에 부착하였다.

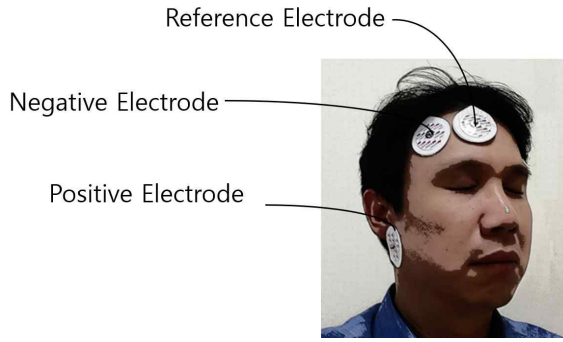


Fig. 5. Electrode attachment diagram of FP1 electrode

IV. 실험 결과 및 고찰

4.1 바이스펙트럼 분석

Fig. 6의 (a)는 외부 아티팩트가 혼입되지 않은 정상적인 각성 상태의 뇌파이다. (b)는 이 뇌파를 bispectrum 분석하여 PSD Map 형태로 출력한 PSD의 크기가 클수록 붉은색으로 표현하도록 되어 있다. 그림에서 볼 수 있듯이 각성 상태를 반영하는 뇌파로 X축 상의 10Hz 인접 구간과 Y축의 10Hz 인접 구간에서 관찰되고 X축과 Y축이 교차하는 지점에서도 관찰된다. 원신호의 주파수 특성이 2차원 평면에 대칭적으로 나타나고 2차원의 평면의 교차 지점에서 관찰되는 특징을 확인할 수 있다.

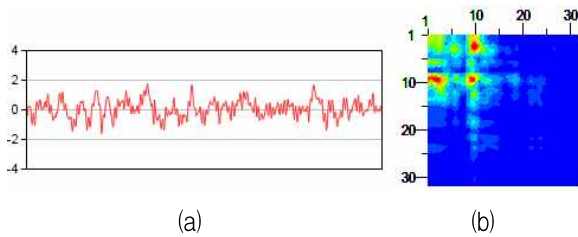


Fig. 6. Bispectrum analysis of normal EEG signal

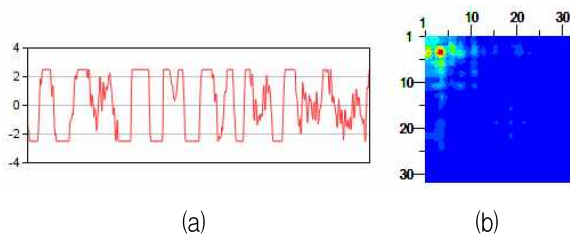


Fig. 7. Bispectrum analysis of EEG signal when using electrosurgical instrument

Fig. 7의 (a)는 전기수술기 사용으로 인해 뇌파와 상관없는 매우 강한 주파수가 유입되었을 경우 뇌파와는

달리 원신호의 주파수 특성이 2차원 평면에 대칭적으로 출현하지 않고 2차원의 평면의 교차 지점에서만 강하게 관찰되는 특징을 확인할 수 있다.

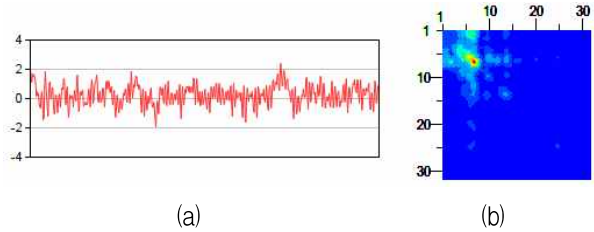


Fig. 8. Bispectrum analysis of defective electrode contact EEG signal

Fig. 8의 (a)는 전극의 접촉 불량으로 인해 왜곡된 신호로 낮은 크기의 고주파수가 유입되어 원 주파수인 10Hz 대역의 신호가 X, Y 교차점에서만 관찰되는 특징이 관찰된다. 데이터 분석 결과로부터 2차원 평면 X, Y 주파수 축에 대칭적으로 신호의 출현이 관찰되지 않으면서 X, Y 주파수 교차점에서만 높은 신호가 관찰된 경우는 뇌파 신호가 아닌 강한 신호 또는 미세한 왜곡 신호가 크게 영향을 주고 있다는 분석이 가능하다.

4.2 마취심도 추출 알고리즘

실험 결과로부터 외부 유입 아티팩트 신호를 분류하는데 바이스펙트럼 주파수 분석 결과를 반영하는 것이 적절할 것이라는 판단에 따라 Fig. 9와 같은 절차로 마취심도 판정 추출과정을 구성한다.

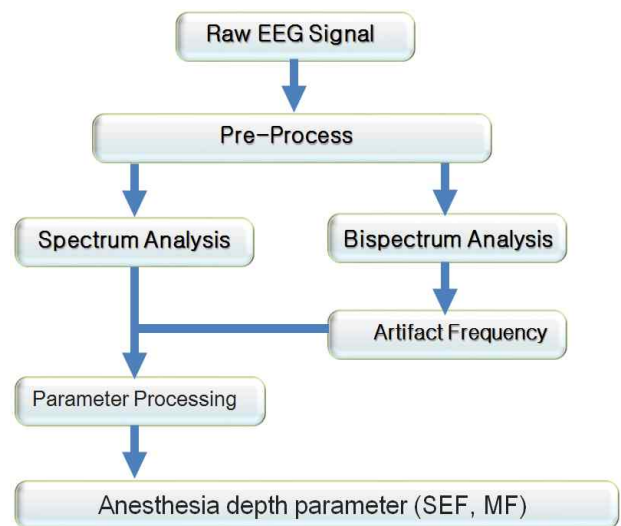


Fig. 9. Anesthetic depth parameter extraction process using Bispectrum analysis

상기와 같은 절차를 95% SEF, MF 지표 추출에 적용하여 아티팩트에 의한 마취심도 판정 파라미터의 왜곡을 경감할 수 있을 것이다. 가중치를 부여하여 마취심도 평가 지표 추출에 적용한다.

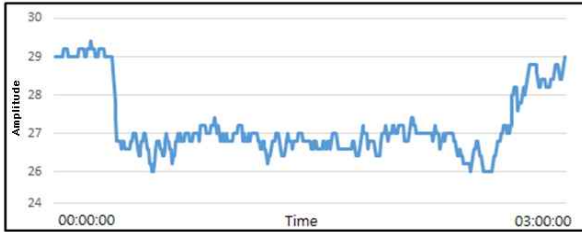


Fig. 10. SEF before applying Bispetrum parameter

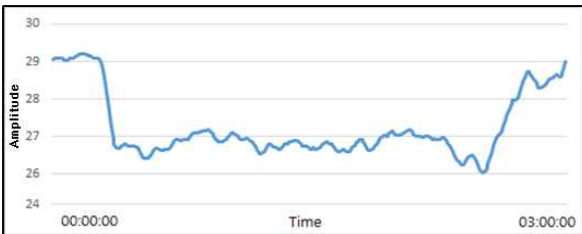


Fig. 11. SEF after applying Bispetrum parameter

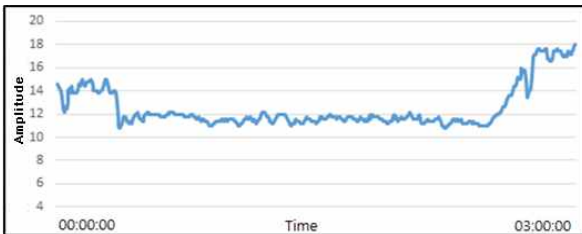


Fig. 12. MF before applying Bispetrum parameter

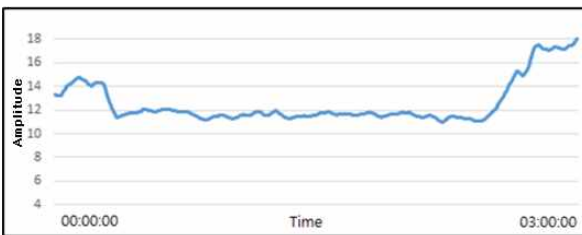


Fig. 13. MF after applying Bispetrum parameter

Fig. 10과 Fig. 12는 Bispetrum 파라미터를 적용하기 전의 SEF, MF 파라미터로 측정 중간과정에서 유입된 아티팩트에 의해 파라미터가 간헐적으로 크게 변화하는 경우가 관찰되었다. Fig. 11과 Fig. 13은 Bispetrum 파라미터를 적용한 후의 SEF, MF 파라미터로 측정 중간과정에서 유입된 아티팩트에 의한 영향이 감소하여

파라미터가 간헐적으로 크게 변화하는 경우가 줄어들었음을 확인할 수 있다.

V. 결론

본 연구의 결과로부터 바이스펙트럼 분석은 아티팩트로 인한 신호의 왜곡의 유무를 추출할 수 있어 뇌파에 인입되어 분석에 영향을 주는 아티팩트를 효과적으로 제거할 수 있는 적절한 파라미터를 제공할 수 있을 것이다. 실시간으로 데이터가 입력되는 과정에서 스펙트럼 연산과 바이스펙트럼 연산을 동시에 진행하고 바이스펙트럼 연산 결과로부터 왜곡 신호의 유입을 판정하도록 하여 스펙트럼 연산을 통해 추출되는 마취심도 파라미터의 가변성을 감소시킬 수 있었다. 이러한 가변성 감소는 수술 현장에서 실시간 활용 가능한 임상 지표로서 SEF, MF와 같은 마취심도 파라미터의 유용성을 제고하여 줄 수 있을 것이다. 본 연구 성과를 활용할 경우 실시간으로 계측을 통한 정량적 마취심도 지표 추출과 관련한 연구에 기여할 수 있을 것으로 기대된다.

ACKNOWLEDGMENTS

이 논문은 2018학년도 동명대학교 교내학술연구비 지원에 의하여 연구되었음(2018A004).

REFERENCES

- [1] Jeleacov C, Fechner J, Schwilden H, "Electro-encephalogram monitoring during anesthesia with propofol and alfentanil; the impact of second order spectral analysis"Anesth Anlog, vol.5, pp. 1365-1369, 2005.
- [2] Wang CM, Guan ZY, Wang QC, Zhang J, Ma Y, Zhao P, "The Effect of Depth of Anesthesia on Hemodynamic Changes Induced by Therapeutic Compression of the Trigeminal Ganglion."Journal of Neurosurgical Anesthesiology, 2019
- [3] Waston DS, James DS : Intravenous conscious sedation:Implications of moniotoring patients receiving local anesthesia. AORN Journal 1990, vol.51, pp. 1512-22.

- [4] Ghoneim, MM, Block RI, "Learning and Memory during general anestheisa" Aneshtesiology, 1997, vol 87, pp. 387-410.
- [5] Jones JG, "Perception and memory during general anesthesia"Br J Anesth, 1994, vol 73, pp 31-37.
- [6] Sandin RH, Enlund G, Samuelsson P, Lennmarken C, "Awareness during anaesthesia: A Prospective case study" Lancet, vol. 335, pp. 707-711, 2000.
- [7] Eric R. Kandel, James H. Swarts, Thomas M. Jessel, Principles of neural science - Fourth Edition, Graw-Hill, 2000.
- [8] Bablyoants, A. Salazae, J. M., and Nicolis. C., "Evidence of chaotic dynamic of brain activity during the sleep cycle"Phys. Lett. A vol. 111, pp. 152-156, 1985.
- [9] H. J. Ben, Wei-Kang Cheung, "Structural EEG engineer", IEEE Engineering in medicine and biology magazine, pp. 41-45, 1988.
- [10] Sigl JC, Chamoun NC, "An introduction to bispectral analysis for the EEG"J Clin Monit., vol. 10 pp. 392-404, 1994.
- [11] Hagihira S, Takashina M, Mori T, Mashimo T, Yoshiya I. ,"Practical issues in bispectral analysis of electroencephalographic signals."Anesth Analg. 2001 Oct, vol.93(4), pp. 966-70.

저자 소개

박 준 모 (Jun Mo Park)



1993년 2월 : 인제대학교
의용공학과(공학사)
1996년 2월 : 인제대학교
의용공학과(공학석사)
2008년 8월 : 부산대학교
의공학협동과정(공학박사)
2018년 3월 ~ 현재 : 동명대학교

전자및의용공학부 교수

관심분야 : 신호처리, 뇌 신경계 신호 분석