

## 뇌파신호의 바이스펙트럼 Coherence와 DFA 알고리즘을 이용한 마취단계 분석

예수영<sup>1</sup> · 엄상희<sup>2\*</sup>

### Analysis stages of anesthesia with Bispectrum Coherence and DFA algorithm of the EEG

Soo-young Ye<sup>1</sup> · Sang-hee Eum<sup>2\*</sup>

<sup>1</sup>Department of Radiological Science, College of Health Science, Catholic University of Pusan, 609-757, Korea

<sup>2\*</sup>Department of Shipbuilding & Marine, the school of engineering, Dongju College, Pusan, 604-715, Korea

#### 요 약

수술시 시행되는 마취과정에서 마취가 깊지 못해서 깨어나는 각성으로 인하여 환자가 정신적·육체적으로 극심한 고통을 경험할 수 있다. 이러한 상태를 미연에 방지하기 위하여 수술중 마취심도를 측정하여 환자상태를 모니터링하는 것이 필요하다. 본 연구에서는 실제 수술시 사용 가능한 정량적인 지표 개발의 가능성을 보고자하였다. 이러한 지표로는 뇌파의 DFA에 의한 맥함수 지수와 바이스펙트럼지수들로 수술 중 이들 지표를 관찰하여 마취심도 측정 가능성을 검증하고자 하였다. 실험결과 수술 전단계에서는 바이스펙트럼이 전영역에 나타나고, DFA값은 감소하는 경향을 나타내었다. 수술 중 단계에서는 바이스펙트럼값이 저주파 대역으로 집중되어 나타나고, DFA값은 증가하는 경향을 나타내었다. 수술 후 단계에서는 바이스펙트럼과 DFA값 모두 수술전 수준으로 돌아가는 현상을 관찰하였다. 따라서 바이스펙트럼의 피크 분포와 DFA값의 변화 경향은 마취 심도와 상관성이 밀접한 것으로 나타났다.

#### ABSTRACT

Due to the anesthesia process is inappropriate on the operation, awakening state was appeared. To prevent the state, it is necessary to monitor the patients by measuring the depth of anesthesia. In this study, we investigate the possibility of the development of actual surgery available quantitative indicators. The DFA which is included the correlation property of the EEG is used to analysis the depth of anesthesia and bispectrum index. In the results, at the pre-operation, the peak of bispectrum was widely distributed, DFA value was decreased. At the during operation, bispectrum was concentrically appeared in the low frequency area. At the post operation, bispectrum and DFA was both returned to the pre-operation state. We confirmed to be close correlation between the peaks of the bispectrum and DFA value.

**키워드** : 바이스펙트럼, DFA, 뇌파

**Key Word** : Bispectrum, Detrended Fluctuation analysis, EEG

Received 01 May 2015, Revised 30 May 2015, Accepted 08 June 2015

\* Corresponding Author Sang-Hee Eum(E-mail:nyx2k@naver.com, Tel:+82-51-200-3448)

Department of Shipbuilding & Marine, the school of engineering, Dongju College, Pusan, 604-715, Korea

Open Access <http://dx.doi.org/10.6109/jkiice.2015.19.6.1471>

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. 서 론

마취는 무의식, 무감각, 무통증, 근육이완, 반사 억제 등의 구성요소로 이루어져있다. 이러한 마취의 구성요소를 적절히 통제하여 최적의 마취가 유지되면 수술 중 절개와 같은 강한 외과적 자극에 대해서도 환자는 통증을 인지하지 못하게 된다. 수술시 필수적으로 이루어지는 마취과정에서 마취가 깊지 못해서 깨어나는 각성으로 인하여 환자가 정신적·육체적으로 극심한 고통을 경험할 수 있다. 이러한 수술 중 각성의 빈도는 연구자와 수술의 종류 또는 환자의 상태에 따라 다르지만 전체 수술의 0.11에서 0.18%에 이른다는 보고가 있다 [1,2]. Sandin[3]등은 일반적인 전신마취시 0.15% 정도의 각성 빈도를 보인다고 보고하였고, Sebel[4]등은 전신마취시 각성의 빈도는 약 0.13%이며, ASA 신체등급이 높을수록 증가하였고 성별이나 나이와는 관련이 없는 것으로 보고하였으며, 소아들에 있어서는 0.8%에 이른다고 보고 하였다[5]. 마취심도를 측정하는 주목적은 수술 중 원치 않는 각성 상태의 발현을 방지하고 마취제를 환자 개개인에게 알맞게 투여하여 적절한 마취 상태를 유지함으로써 마취제의 낭비를 막고 과용량에 의한 부작용도 최소화하면서 수술 후 조속히 각성시키는데 있다. 현재 수술 중에 사용되는 마취제 중 진정제의 효과를 나타내는 지표로 뇌파의 주파수와 위상을 이용하여 환자의 의식 상태를 추측하는 BIS (Bispectral Index)가 일반적으로 사용되고 있다[6]. 심전도의 HRV를 이용하여 측정하는 자율신경계영향으로 마취심도를 측정하는 연구도 많이 진행되고 있으나 실제 수술 시에는 사용되지 못하고 있다.

본 연구에서는 실제 수술 시 사용 가능한 정량적인 진통 효과 지표 개발의 가능성을 보고자하였다. 이러한 지표로는 뇌파의 DFA에 의한 멱함수 지수와 BIS들로 수술 중 이들 지표를 관찰하여 마취심도 측정 가능성을 검증하고자 하였다.

## II. 연구 방법

### 2.1. 데이터 획득

마취과 학회에서 제공하는 신체 분류 등급 중 ASA1 (건강한 환자), ASA2(경한 전신 질환, 기능 제한 없음)

등급의 환자를 대상으로 하였으며, 치매 또는 신경 정신 병력을 가지고 있을 경우 획득된 신호에 영향을 미치므로 배제 하였다. 수술 도착 후 의식 소실 목적으로 Thiopental sodium 4 mg/kg을 투여하고, 흡입 마취제인 enflurane를 투여하여 1.6-2.0%로 유지하였다. 마취환자의 뇌파 신호를 계측하기 위하여 P병원 산부인과에 내원한 수술 환자 중 비교적 수술시간이 짧고 전신 흡입마취 시술을 받는 환자를 대상으로 실험을 수행하였으며 사전에 수술 대상 환자에게 연구의 취지를 설명하여 환자의 동의를 구한 후 뇌파 데이터를 획득하였다. 대상 환자의 평균 연령  $48.9 \pm 10.9$  세이고, 평균 체중은  $57.1 \pm 8.2$  kg, 평균 신장은  $158 \pm 6.6$  cm 이었다. 뇌파 신호 획득을 위하여 생체신호계측기 (PhysioLab 400, PhysioLab Co., KOREA)를 사용하였고, 전두엽 FPI 전극 배치법을 사용하여 뇌파를 측정하였다.

### 2.2. 바이스펙트럼 분석 방법

바이스펙트럼 분석은 신호의 2차원 푸리에 변환으로 정의되어지며, 뇌의 구조적 중심을 신호 발생원으로 가정 했을 때 뇌기능 변화에 따른 뇌파 상호간의 비선형적인 상호 연동 현상을 반영 한다고 할 수 있다. 생체 신호분석에 많이 이용되고 있는 파워스펙트럼 밀도 (power spectrum density : PSD)도 매우 유용한 분석 방법이지만, 이 분석방법은 신호의 페이저(phase)에 관한 정보를 알 수 없다. 반면, 바이스펙트럼과 바이코히어런스는 매우 비슷한 분석방법으로 생체신호 처리에 있어서 유용한 정보를 배제하지 않고 신호의 특성을 파악할 수 있게 한다. 바이스펙트럼을 정의하면 다음과 같다.

$$B(j,m) = \frac{1}{L} \sum_{l=0}^{L-1} \widetilde{h_{ij}} \widetilde{h_{lm}} \widetilde{h_{l(j+m)}}^* \quad (1)$$

여기서,  $h_k$  는 계측되어진 생체신호이고, L은 신호 길이를 나타내었다.

바이스펙트럼은 다른 주파수대역에서 페이저의 상관관계에 대한 크기를 정량적으로 계산하는 방법이다 [7]. 다른 대역신호와 관련된 다중 주파수를 포함하는 신호는 흥미로운 바이스펙트럼 구조를 나타낸다. 바이코히어런스는 0과 1사이로 정규화 되어진 바이스펙트럼의 크기를 정량적으로 계산하는 방법이고, 다음과 같이 정의되어진다[8].

2.3. DFA 분석 방법

인체는 내부 신진대사와 같은 고유한 생리학적 제어에 의한 뇌파의 변화와 외부 자극에 의한 뇌파의 진동이 같이 혼합된 상태이다. DFA(Detrended Fluctuation analysis) 분석 방법은 뇌파의 이 두 상태를 분리하고자 한다. 분석 하고자하는 데이터의 길이가 N인 뇌파 신호를  $x(t)$ 라고 가정 하였다. DFA 알고리즘의 첫 번째 단계  $x(t)$  신호를 적분하는 것으로 식(3)에 나타내었다.

$$b^2(j,m) = \frac{|\sum \tilde{h}_{lj} \tilde{h}_{lm} \tilde{h}_{l(j+m)}^*|^2}{\sum |\tilde{h}_{lj} \tilde{h}_{lm}|^2 \sum |\tilde{h}_{l(j+m)}|^2} \tag{2}$$

$$= L^2 \frac{|B(j,m)|^2}{\sum |\tilde{h}_{lj} \tilde{h}_{lm}|^2 \sum |\tilde{h}_{l(j+m)}|^2}$$

본 연구에서는 실시간 (매 10초)으로 비선형 바이스펙트럼 분석을 실행하였고, 그 결과를 2차원 맵의 형태로 출력 하였다. 마취 진행 단계에 따른 2차원 맵은 주요 마취 진행 과정, 즉 수술전(각성상태), 수술중(마취중), 수술후(각성상태)의 상태를 잘 반영 하는 것으로 관찰되어 졌다.

$$y(k) = \sum_{i=1}^N (x(t) - x_{average}) \quad k=1,2 \dots N \tag{3}$$

여기서,  $x(t)$ 는 뇌파의 신호이고,  $x_{average}$ 는 뇌파 신호의 평균값, N 데이터의 총 길이를 나타낸다.

다음 단계로 총 데이터 길이 N을 n길이의 윈도우로 나눈다. 윈도우의 길이 마다 세로 점선으로 표시하였고, 윈도우 길이 n에 해당하는 윈도우 내에 있는 데이터들을 1차 선형 근사화하여  $y_n(k)$ 의 직선을 긋는다. 그리고 적분된  $y(k)$ 에서 선형 근사화된  $y_n(k)$ 을 빼준 다음 제곱근 평균  $F(n)$ 을 구하기 위하여 다음과 같은 수식을 적용하였다.

$$F(n) = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{k=1}^N (y(k) - y_n(k))^2} \tag{4}$$

수식 (4)에서 윈도우 크기 n을 변화시켜가면서 모든 윈도우의 길이에 대해  $F(n)$ 을 구한다. 이때 윈도우의 길이 n이 커질수록  $F(n)$ 의 값도 아래 수식에 따라 증

가하게 된다. 그림 1과 같이 윈도우 크기에 따른  $F(n)$  값을 로그 스케일로 변환하여 구간별 기울기인  $\alpha_1, \alpha_2$ 를 구할 수 있다.

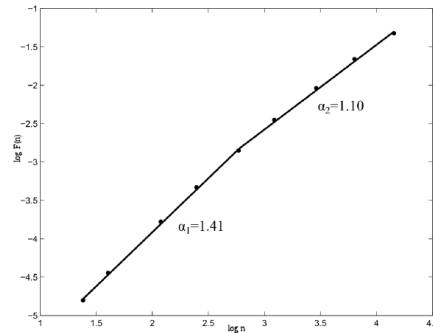


그림 1. 윈도우 크기에 따른 F(n)결과  
Fig. 1 The results of the F(n) on the window size

$\alpha_1$  은 윈도우크기 1초부터 10초까지 구간의 기울기를 구하고,  $\alpha_2$ 는 윈도우크기가 10초에서 30초까지 구간의 기울기를 구하였고,  $\alpha_3$ 은 1초에서30초까지의 구간에서 기울기를 구하였다.

III. 실험 결과

3.1. 바이스펙트럼 분석

그림 2는 10초간의 데이터 분석 결과를 나타내었다. 수술 단계 별 5초동안 오버랩된 10초의 데이터로 2차 맵 결과로 나타내었다.

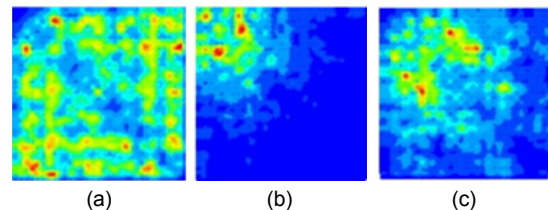


그림 2. 마취 중 바이스펙트럼 분석 (a) 수술 전 (b) 수술 중 (c) 수술 후  
Fig. 2 Bispectrum analysis during anesthesia (a) Pre-operation (b) Operation (c) Post-operation

수술 전인 각성 상태에서의 파워스펙트럼 밀도 분포는 1 ~ 32 Hz 전구간에 걸쳐 나타나고, 짙은 적색의 피

크는 주로 10, 10Hz 주파수 좌표 이상의 구간에서 주로 출현하고 있음을 확인 할 수 있다. 수술 중 데이터에서는 파워스펙트럼 밀도 분포가 현격하게 1~15 Hz 이내에 집중 되어 짐을 확인 할 수 있었다. 또한 적색으로 표시되는 주요 피크가 10, 10 Hz 주파수 좌표 지점 이내에 집중되어 나타남을 확인 할 수 있다.

수술 후 (각성상태) 상태에서는 수술 전과 유사하게 파워스펙트럼 밀도 분포는 전구간 1~32Hz에 걸쳐 나타나고 주요 짙은 적색으로 나타나는 피크는 10, 10Hz 주파수 좌표 이상의 구간에서 주로 출현하고 있음을 확인 할 수 있다.

본 연구에서 실험 환자들에게서 거의 동일한 위치에서 피크 출현 현상을 보임으로써 유의한 특성을 관찰 할 수 있었다. 따라서 그림 3과 같이 마취영역과 각성영역을 설정하여 이 위치의 피크 출현 정보를 인덱스 추출에 이용하여 마취심도를 평가 하였다.

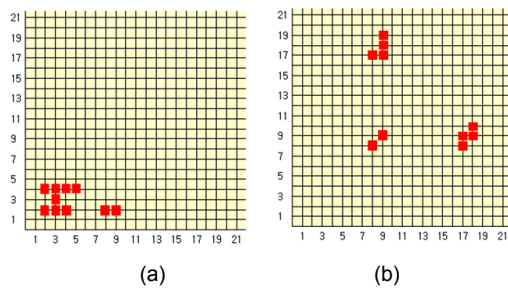


그림 3. Bispectrum의 마취와 각성영역 설정 (a) 마취영역 (b) 각성영역  
**Fig. 3** Anesthesia and awake area of the Bispectrum (a) Area of anesthesia (b) Area of awake

그림 3의 마취영역의 10개 좌표에서의 피크값의 합을 A로 정하고, 각성영역의 10개의 좌표에서의 피크값의 합을 B로 정하였다. 마취단계를 평가하기 위한 새로운 파라미터는 식(5)를 이용하여 구하였다.

$$\text{새로운지표} = B/A + B \quad (5)$$

새로운 지표를 이용하여 수술중 마취 단계별 값을 그림 4에 나타내었다.

그림 4에서 새로운 지표를 이용하여 마취단계를 분석한 결과 수술전 단계에서는 58-85의 값을 나타내었다. 수술 중 단계에서는 21-58의 값을 나타내었고, 각성

단계에서는 60-72의 값을 나타내었다.

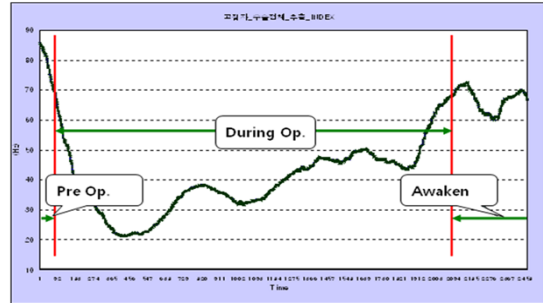


그림 4. 새로운 지표를 이용한 마취단계별 마취심도  
**Fig. 4** Depth of anesthesia using new index

새로운 지표를 이용하여 10명의 환자에서 분석한 결과를 표 1에 나타내었다.

표 1. 새로운 지표를 이용한 마취단계 결과 값  
**Table. 1** Anesthesia values using new index

Anesthesia states	Pre-Op.	During Op.	Awaken
New index	55-90	20-60	60-80

### 3.2. DFA 분석

DFA분석은 30초 간격으로  $\alpha_1, \alpha_2, \alpha_3$ 를 계산 한 후 시간에 따른 각 파라미터들을 그림 4, 5, 6에 나타내었다.

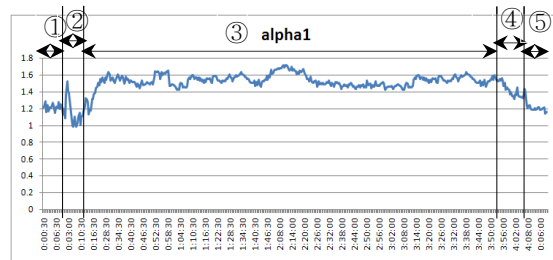


그림 5. 마취 중  $\alpha_1$  값 변동  
**Fig. 5**  $\alpha_1$  variation during total period of anesthesia

그림 5에서 ①구간은 수술 전(pre-operation) 과정을 나타내었고, ②과정은 수술실에 들어온 환자에게 펜토 탈이 주입되고 바로 기관내 삽관하는 과정을 나타내었다. ①과 ②과정을 합쳐서 수술전 과정으로 정하였다.

③은 수술 과정을 나타내었고, ④는 마취 약제가 중지된 후 기간을 나타내었고, ⑤는 수술 후 안정을 찾을 상태를 나타내었다. ④, ⑤과정을 합쳐서 수술 후 과정으로 정하였다.

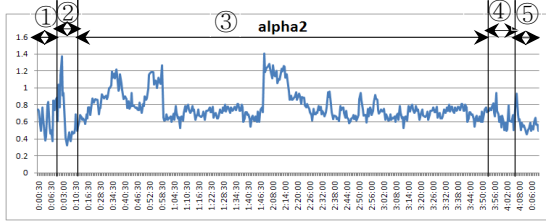


그림 6. 마취 중  $\alpha_2$  값 변동  
Fig. 6  $\alpha_2$  variation during total period of anesthesia

그림 6은  $\alpha_2$ 의 수술 전 중 후의 값을 나타내었다. 그림 7은  $\alpha_3$ 의 수술 전 중 후의 값을 나타내었다.

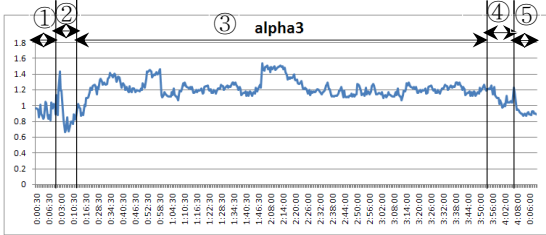


그림 7. 마취 중  $\alpha_3$  값 변동  
Fig. 7  $\alpha_3$  variation during total period of anesthesia

#### IV. 고찰 및 결론

뇌파의 비선형성을 표현할 수 있는 바이스펙트럼 분석을 통해 새로운 지표 개발을 시도하고자 하였다. 이를 위해 2차원 맵을 통해 바이스펙트럼 분석이 마취 단계별로 특성화된 양상으로 나타남을 확인함으로써 바이스펙트럼 분석의 유용성을 확인 하였다. 2차원 맵 형태의 바이스펙트럼의 영상을 정량화된 수치로 표현할 필요성이 있었다. 마취 영역과 각성 영역으로 나누어 새로운 지표를 생성하였다. 이를 이용하여 수술중 마취 단계를 측정할 결과 수술전은 55-90의 값을 나타내었고, 수술중은 20-60의 값을, 각성 단계는 60-80의 값을 나타내어 이를 이용하여 실시간 마취 심도를 측정할 수

있음을 확인하였다.

DFA는 수술전 단계 중 기관내 삽관 동안은 피크치를 나타내어 큰 값을 나타내다가 급격히 감소하는 결과를 나타내었다. 수술중 단계에서는 다양한 자극에 대하여 여러 가지 반응들을 나타내었다. 마취 약제를 중지한 마취 후단계에서는  $\alpha_1$ 의 값이 감소하여 수술전 단계의 값까지 회복됨을 알 수 있었다.  $\alpha_2, \alpha_3$ 도 비슷한 경향을 나타내었다. 2차원 영상형태로 나타나는 바이스펙트럼은 수술전 단계에는 피크값이 전구간에 걸쳐 나타나고, DFA의 값은 기관내 삽관기간을 제외하면 감소하는 경향을 나타내었다. 수술중 단계에서는 바이스펙트럼의 피크값이 1 ~ 15 Hz 이내에 집중되어 나타나고, DFA의 값은 증가하는 경향을 나타내었다. 수술 후 단계에서는 바이스펙트럼은 수술 전단계와 같은 수준으로 피크값이 전구간에 걸쳐 나타나고, DFA의 값은 수술전 단계의 값 수준으로 감소하는 경향을 나타내었다.

본 실험에서 알 수 있듯이 수술 중 마취 단계에 따라서 바이스펙트럼의 피크 분포와 DFA값의 변화 경향은 마취 심도와 상관성이 밀접한 것으로 나타났다. 추후 이를 이용하여 마취심도를 측정할 수 있는 정량적인 파라미터 개발에 이용할 수 있을 것으로 생각된다.

#### REFERENCES

- [1] Davidson AJ, Huang GH, Czarnecki C, Gibson MA, Stewart SA, Jansen K., "Awareness during anesthesia in children: a prospective cohort study", *Anesth Analg*, vol. 100, pp.653-661, 2005.
- [2] Liu WH, Thorp TA, Graham SG, Aitkenhead AR, "Incidence of awareness with recall during general anaesthesia", *Anaesthesia*, vol. 46, pp.435-437, 1991.
- [3] Sandin RH, Enlund G, Samuelsson P, Lennmarken C., "Awareness during anaesthesia: a prospective case study", *Lancet*, vol. 355, pp. 707-711, 2000.
- [4] Sebel PS, Bowdle TA, Ghoneim MM, Rampil IJ, Padilla RE, Gan TJ, et al., "The incidence of awareness during anesthesia: a multicenter United States study", *Anesth Analg*, vol. 99, pp. 833-839, 2004.
- [5] Ghoneim MM., "Awareness during anesthesia", *Anesthesiology*, vol. 92, pp.597-602, 2000.
- [6] Satisha M, Sanders GM, Badrinath MR, Ringer JM, Morley

- AP., "Introduction of bispectral index monitoring in a district general hospital operating suite: a prospective audit of clinical and economic effects", *Eur J Anaesthesiol*, vol. 27, pp.196 - 201, 2010.
- [7] Helmut Schwilden, "Concepts of EEG processing : from power spectrum to bispectrum, fractals, entropies and all that," *Best Practice & Research Clinical Anaesthesiology*, vol. 20, no. 1, pp. 31-48, 2006.
- [8] J. D. Park, S. Y. Ye, G.R. Jeon, Y. Huh, "The estimation of the depth of anesthetic using higher-order spectrum analysis of EEG signals," *J. Biomed. Eng. Res*, vol. 28, pp. 287-283, April, 2007.



**예수영(Soo-Young Ye)**

부산대학교 전자공학과 공학석사  
부산대학교 의공학협동과정 공학박사  
부산가톨릭대학교 방사선학과 교수  
※관심분야 : 영상처리, 신호처리, 의공학, 방사선과학



**엄상희(Sang-Hee Eum)**

동아대학교 전기공학과 공학석사  
부산대학교 전자공학과 공학박사  
동주대학교 조선해양학과 교수  
※관심분야 : 영상처리, 신호처리, 의공학, IT융합