

# 청각자극에 의한 쾌/불쾌 감성상태의 뇌파에 대한

## 바이스펙트럼 분석

김용수, 조덕연, 이유정, 류창수\*  
선문대학교 전자정보통신공학부  
\*한국전자통신연구원 기초기술연구부  
E-mail : eskim@omega.sunmoon.ac.kr

## A Bispectrum Analysis of the EEG

### In Positive and Negative Emotional States

### Evoked by Auditory Stimuli

Eung-Soo Kim, Duk-Yun Cho, You-Jung Lee, Chang-Su Ryu\*  
Dept. of Electronics & Information Communication Eng., Sunmoon University  
\*Basic Research Lab., Electronics & Telecommunications Research Institute  
E-mail : eskim@omega.sunmoon.ac.kr

#### 요약

청각자극에 의한 쾌/불쾌 감성상태의 특징을 구별하기 위하여 21채널의 측정된 뇌파신호를 이용하였다. 이를 위하여 비선형 분석 방법인 바이스펙트럼 분석을 도입하였으며 청각신호에 잘 반응하는 T3, T4 채널에 대하여 조사하였다. 쾌한 감성 상태에서는 비슷한 주파수 쌍의 상호작용이 크며, 불쾌한 상태에서는 차이가 큰 주파수 쌍의 상호작용이 큼을 알 수 있었다.

#### 1. 서론

1928년 Hans Berger는 인간의 뇌 표면에서 자발적 전기활동을 최초로 기록하고 이를 EEG(Electroencephalogram, 뇌파)라고 명명하였다. 그 후 뇌파는 신호처리분야의 발전과 함께 뇌 활동의 변화를 시간적, 공간적으

로 파악하는 수단으로서 활발히 연구되어져 왔다[1][5][7][17]. 또한 간질병이나 정신분열증 진단 등과 같은 임상에서의 사용뿐만이 아니라 최근에는 인간의 감성상태를 분석하고 나타내기 위한 수단으로서 그리고 두뇌의 정보처리 원리를 해명하려는 노력의 일환으로도 적극적으로 사용되고 있다[2][3].

수많은 신경세포인 뉴런으로 결합된 뇌 시스템에서 발생하는 전기적 신호인 뇌파는 단순히 랜덤신호가 아닌 카오스 신호임이 여러 연구결과로 밝혀지고 있다[11]. 이는 비선형 소자인 뉴런의 동작이 카오스라는 연구결과와 함께, 이러한 비선형 소자가 다수 결합된 뇌 시스템의 동작이 카오스적이라는 것은 어찌면 당연한 일일 것이다. 따라서 뇌에서 발생한 뇌파도 비선형 카오스 계의 특징을 반영할 것이며, 이러한 비선형 동역학계의 분

석방법의 하나로 고차 스펙트럼 분석을 들 수 있다.

파워스펙트럼 분석은 뇌파신호 뿐만이 아니라 통신분야, 음성처리분야 등의 다른 비선형 동력학계의 해석에도 지금까지 자주 사용되고 있으며, 매우 가치 있는 결과들을 보여주고 있다. 하지만 이 분석법은 시스템의 푸리에 성분간 비선형 상호 간섭작용에 대한 직접적인 정보를 제공하지 않는 단점이 있다. 즉 주파수 성분이 상호 간섭하여 위상이 결합되어있는 시스템의 비선형 메커니즘을 설명할 수 없게 된다.

따라서 이러한 비선형 프로세스로부터 위상정보까지 줄 수 있는 것은 파워스펙트럼보다 한 단계 더 높은 차원(제곱의 비선형성)의 스펙트럼인 바이스펙트럼이다. 이는 하나의 주파수가 다른 하나의 주파수와 관련되어 새로운 제 3의 주파수를 만드는 계의 특성을 반영해 준다. 즉 파워스펙트럼이 신호에 섞인 주파수 성분의 기여도를 크기에 반영하여 나타내어 주는데 비해, 바이스펙트럼은 어떠한 주파수 성분이 계 내에서의 독립적인 두 주파수의 관련성(quadratic coupling)에 의해 발생되었다는 위상정보를 보여준다. 따라서 특정한 주파수 값이 독립적인 계의 단위에서 비롯되지 않고 어떠한 원리에 의해 발생되는지를 알려줌으로써 신호를 발생시키는 계의 구체적인 메커니즘을 이해하는데 도움이 된다[5][7][12][13].

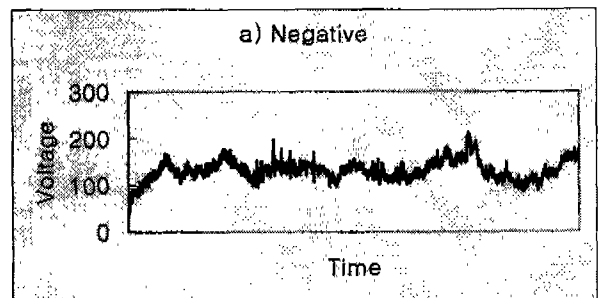
본 논문에서는 인간이 쾌/불쾌라는 감성상태에 있을 때 발생하는 뇌파를 이용하여 이를 구분 지을 수 있는 방법 및 측정 파라미터에 대한 연구결과를 나타낸다. 이를 위해 18명의 피검자를 대상으로 측정된 뇌파에 대해 비선형 분석법 중의 하나인 바이스펙트럼 분석을 이용한 결과에 대해 기술한다.

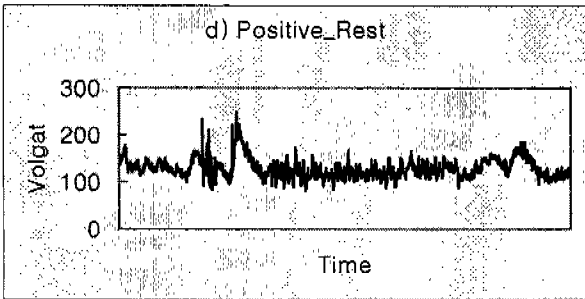
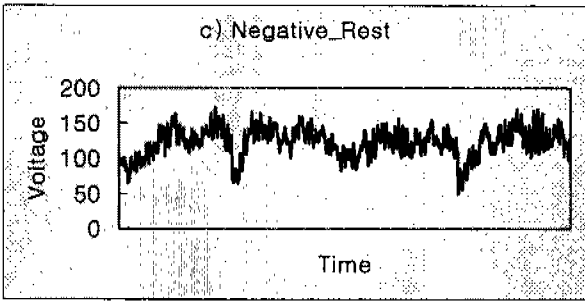
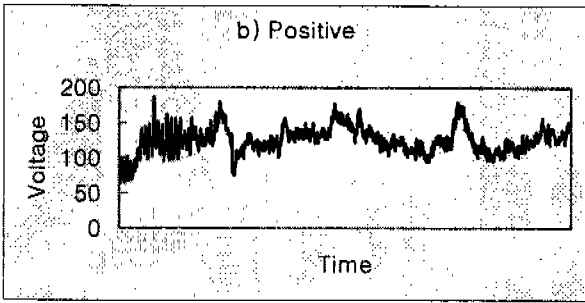
## 2. 방법

### 2.1 데이터 수집

뇌파를 측정하기 위한 실험장치는 크게 감성유발을 위한 시스템과 데이터 수집을 위한 시스템의 두 가지로 구분된다. 우선 피검자들은 약 20세의 청각에 장애가 없는 대학생들로 남자 10명, 여자 8명으로 하였다. 이들에게는 다음과 같은 동일한 조건을 부여했다. 안락하게 누운 자세에서 눈을 감은 채 무작위 소리 자극을 주었는데, 이때 한 자극에 대해 30초의 자극시간을 주고, 그 다음 자극을 위한 대기시간으로 무자극 상태로 2분을 주었다. 청각자극을 위해 오디오 시스템을 이용하였다. 자극 내용은 쾌/불쾌의 감성을 유발할 수 있는 소리를 선정하였다.

뇌파측정을 위해 10/20 국제표준 전극배치를 따라 21개 전극을 두피에 배치했으며 기준전극은 양쪽 귀로 하였다. 뇌파측정 장치는 Spectrum 32 D/P (Cadwell)을 사용하고 표본추출 시간간격(sampling time)은 약 5ms(0.00488 sec)로 하였다. 이렇게 해서 얻은 데이터는 쾌(positive), 불쾌(negative), 쾌전 휴식(positive\_rest), 그리고 불쾌전 휴식(negative\_rest) 4가지 상태이다. 우리는 21채널 중에 고속 푸리에 변환(FFT, fast fourier transform) 결과로부터 청각자극에 대한 반응을 잘 나타낸 T3와 T4 채널을 선택하여 분석하였다[4][8]. 분석에 사용된 뇌파 중 10번째 피험자의 T3채널에 대한 신호를 그림 1에 도시하였다.





[그림 1] 피험자 10번에 대한 T3 채널의 4가지 상태에 대한 뇌파신호

## 2.2 바이스펙트럼과 바이코히어런스

바이스펙트럼을 포함한 고차통계 스펙트럼 (Higher-Order Statistics spectra)은 Moment와 Cumulant 값으로 정의되어지는데 먼저 이 값들에 대해서 정의하면 다음과 같다.

Moment는 정상상태(stationary)인 독립적인 신호  $\{X(k)\}$  ( $k=0, \pm 1, \pm 2, \dots$ )가 있을 때 다음과 같이 정의된다.

$$m_n^x(\tau_1, \tau_2, \dots, \tau_{n-1}) = E \{X(k) X(k+\tau_1) \dots X(k+\tau_{n-1})\} \quad (1)$$

위의 식(1)에서 2차 Moment 함수는  $\{X(k)\}$

의 자기상관값인  $m_2^x(\tau) = E \{X(k) X(k+\tau)\}$  이

고 3차 Moment 함수는 Triplecorrelation 값인

$$m_3^x(\tau_1, \tau_2) = E \{X(k) X(k+\tau_1) X(k+\tau_2)\} \text{이다.}$$

$E\{\bullet\}$ 는 기대치(Expected value)를 나타낸다.

Cumulant는 정상상태인 non-Gaussian random 신호  $\{X(k)\}$  ( $k=0, \pm 1, \pm 2, \dots$ )가 있을 때 다음과 같이 정의된다.

$$c_n^x(\tau_1, \tau_2, \dots, \tau_{n-1}) = m_n^x(\tau_1, \tau_2, \dots, \tau_{n-1}) - m_n^G(\tau_1, \tau_2, \dots, \tau_{n-1}) \quad (2)$$

즉, n차 Moment 함수에서 Gaussian n차 Moment 함수를 빼 준 값이다. 따라서  $X(k)$  함수가 Gaussian 함수이면 Cumulant 값은 0이 된다.

이렇게 각각 정의되어진 Moment는 결정론적인 신호분석을 위해 많이 사용되고, Cumulant는 확률적인 신호분석을 위해 이용된다. 즉, higher-order spectra는 higher-order statistics를 고차원 Fourier Transform 한 값이다. 그러므로 바이스펙트럼을 Cumulant 항으로 정의 할 수 있다.

$$B_3^x(\omega_1, \omega_2) = \sum_{\tau_1=-\infty}^{\infty} \sum_{\tau_2=-\infty}^{\infty} c_3^x(\tau_1, \tau_2) \exp\{-j(\omega_1\tau_1 + \omega_2\tau_2)\} \quad (3)$$

$$|\omega_1| \leq \pi, |\omega_2| \leq \pi, |\omega_1 + \omega_2| \leq \pi$$

위에서 설명한 바이스펙트럼 식(3)을 주파수영역에 대한 식으로 바꾸면 다음과 같다. 실수값을 가지는 이산적인 샘플링 시계열  $\{X(k)\}$  ( $k=0, 1, \dots, M-1$ )의 푸리에 변환을 다음 식에 나타낸다.

$$X(k) = \frac{1}{M} \sum_{m=0}^{M-1} x(m) e^{-j2\pi km/M} \quad (4)$$

위에서 얻어진  $X(k)$ 값으로 부터 바이스펙트럼  $B(k, l)$ 과 바이코히어런스  $b(k, l)$ 을 각각 정의 내리면 식 (5), (6)과 같다.

$$B(k, l) = E[X(k)X(l)X^*(k+l)] \quad (5)$$

$$b(k, l) = \frac{|B(k, l)|}{[P(k)P(l)P^*(k+l)]^{1/2}} \quad (6)$$

여기서  $k$ 와  $l$ 은 주파수 지수를 나타내고,  $X(\bullet)$ 은 시계열의 복소수를 가지는 푸리에 계수,  $*$ 는 공액복소,  $E[\bullet]$ 은 기대치를 나타낸다. 또한  $P(k)$ 는 파워스펙트럼 값이다[9][13][14].

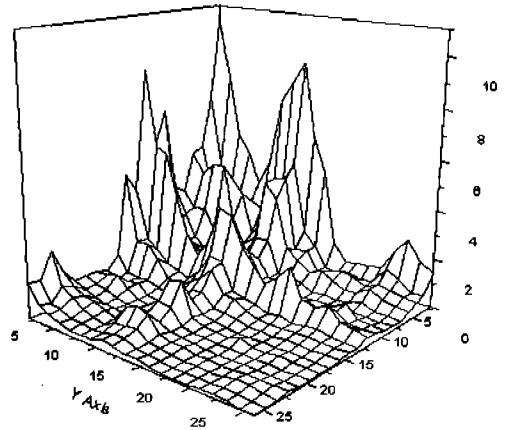
### 3. 바이스펙트럼에 의한 데이터 분석

측정된 뇌파로부터 바이스펙트럼 분석을 통하여 획득된 데이터 값을 정규화시킨 것이 바이코히어런스인데, 어느 주파수 대역에서의 상호작용이 큰가를 피크값을 통해 시각적으로 관찰할 수 있다.

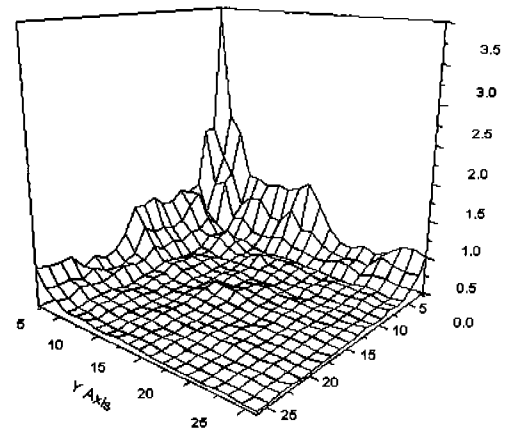
T3 채널에서 측정하여 계산된 각 주파수 대역에서의 바이스펙트럼 값을 그림 2에 나타낸다. 가로 축과 세로 축은 주파수 값을 나타내며 나머지 z축은 바이스펙트럼 값을 나타낸다. 높게 솟은 피크값들을 통해 주파수들의 상호작용이 어느 대역에서 일어나고 있는지를 알 수 있다.

측정된 뇌파신호의 Sampling time 은 0.0048 sec 이고 2048 개의 데이터를 64 개의 set 으로 사용하였다.

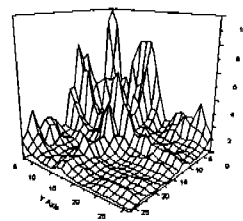
피크의 위치와 위상 커플링의 경향을 잘 볼 수 있도록 3 차원 그래프로 표시한 그림을 통해 알 수 있는 바와 같이, 쾌한 상태와 불쾌한 상태에서의 뇌파의 변화는 확실한 차이를 나타내고 있으며, 쾌/불쾌 자극을 주기 전의 휴식 상태에서의 위상 커플링의 상태는 특별한 차이를 보이지 않는다.



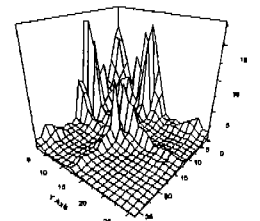
(a) 쾌한 자극



(b) 불쾌한 자극



(c) 쾌한 자극 전



(d) 불쾌한 자극 전

[그림 2] 쾌/불쾌 청각자극에 따른 뇌전위 신호의 바이코히어런스

각각의 청각자극에 의한 쾌/불쾌 감성상태의 뇌파에 대한 바이스펙트럼 분석을 수행한 결과들을 살펴보면 다음과 같은 특징들을 발

견할 수 있다.

첫째, 패한 청각자극 (그림 3의 경우)

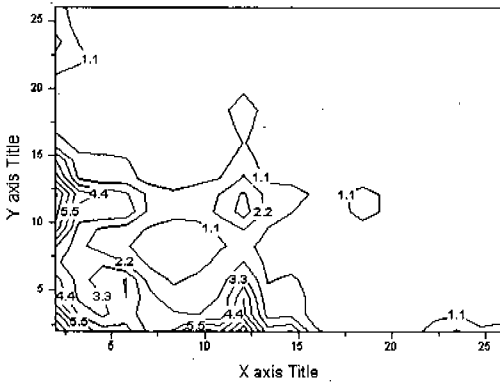
- 유사한 주파수대역에서 상호 간섭작용이 강하다.

둘째, 불패한 청각자극 (그림 4의 경우)

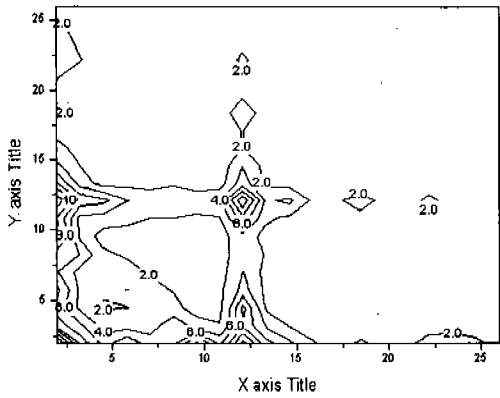
- 차이가 큰 주파수 대역에서의 상호 간섭작용이 강하게 일어난다.

셋째, 패/불패 청각자극 전 (그림 5의 경우)

- 유사한 주파수 대역과 차이가 큰 주파수 대역에서 골고루 상호 간섭작용이 일어난다.

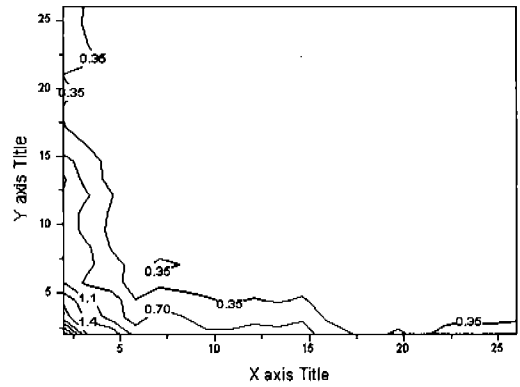


(a) T3채널

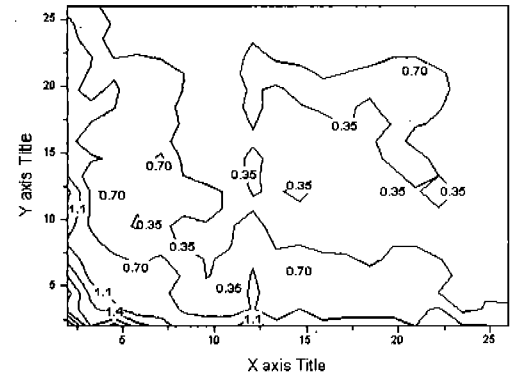


(b) T4채널

[그림 3] 패한 청각자극시의 바이스펙트럼

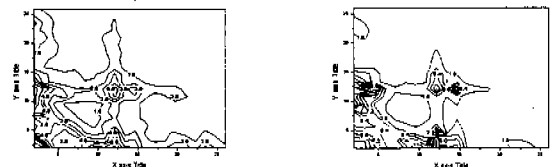


(a) T3채널



(b) T4채널

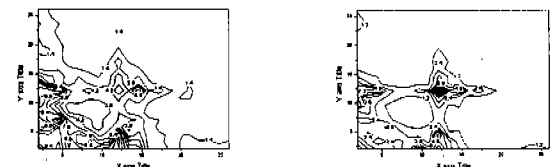
[그림 4] 불패한 청각자극시의 바이스펙트럼



(패전)

(불패전)

(a) T3채널



(패전)

(불패전)

(b) T4채널

[그림 5] 패/불패한 청각자극 전 휴식의 바이스펙트럼

또한 그림 3와 그림 4을 좀더 자세히 비교해 보면, 쾌한 감성상태가 불쾌한 감성상태일 때보다 상대적으로 많은 피크치를 나타내는 것을 볼 수 있다. 즉 위상 커플링(phase coupling)이 상대적으로 많이 일어난다는 것을 보여주는 것이다. 이것으로 뇌의 활동은 쾌한 감성상태일 때가 불쾌할 때 보다 더욱 활성화 된다고 볼 수 있다.

18명의 피검자를 대상으로 동일한 조건과 환경속에서 측정된 뇌파임에도 불구하고, 이번 조사에서 나타난 특징은 모든 뇌파 데이터가 위의 그림에서 보여지듯이 쾌/불쾌의 감성상태를 특징적으로 잘 구별할 수 있는 것은 아니었다. 그것은 뇌파의 측정 과정에서 삽입된 근전도와 같은 잡파에 의한 것인지, 아니면 개인적 특이성이나 눈 깜박임과 같은 동작에 의한 것인지 이유가 뚜렷하지 않았다. 이에 대해서는 보다 정확한 뇌파 데이터 측정을 위한 심도있는 고찰이 필요할 것이다. 그러나, 뇌파가 위와 같이 기존 지식의 모호함, 신경세포에서 두피까지 이르는 동안 정보의 손실, 뇌파의 미시적 원천(신경세포)에 비해 거시적인 측정방법, 현장에서 근거가 충분하지 않은 응용 등 뇌파를 이용하려면 풀어야 할 문제가 너무 많다. 그럼에도 불구하고 뇌파에 대한 연구가 더욱 증대되는 것은 측정시 인체에 아무런 해를 주지 않는다는 것, 적극적인 행위가 없더라도 누구에게서나 끊임없이 나오고 있다는 것, 그리고 축적된 임상지식이 있다는 것에 연유한다고 생각된다. 따라서 앞으로도 뇌파에 대한 많은 연구가 이루어질 것이며, 이를 해석하기 위해 바이스펙트럼 뿐만이 아니라 많은 비선형 파라미터들이 이용 될 것이다.

#### 4. 결론

본 논문에서는 청각자극에 의한 쾌/불쾌 감

성상태의 특징을 구별하기 위하여 양쪽 귀를 기준 전위로 한 몽타주에서 21채널의 측정된 뇌파신호를 이용하였다. 본 실험에서는 이 중에서도 비교적 청각신호에 잘 반응하는 T3, T4 채널에 대하여 조사하였으며, 쾌/불쾌 감성상태의 특징을 구별하기 위하여 비선형 분석 방법인 바이스펙트럼 분석을 도입하였다. 그 결과 쾌한 감성 상태에서는 비슷한 주파수 쌍의 상호작용이 크며, 불쾌한 상태에서는 차이가 큰 주파수 쌍의 상호작용이 큼을 알 수 있었다. 또한 쾌한 감성상태가 불쾌한 감성상태일 때보다 상대적으로 많은 피크치를 나타내며, 위상 커플링(phase coupling)이 상대적으로 많이 일어난다는 것을 알 수 있다. 이것으로 뇌의 활동은 쾌한 감성상태일 때가 불쾌할 때 보다 더욱 활성화 된다고 볼 수 있다.

또한 이러한 사실로부터 쾌/불쾌와 같은 감성상태의 분석 뿐만이 아니라 고차 뇌기능의 특성을 규명하기 위해서 바이스펙트럼이 유용한 파라미터로서 활용 가능성을 알 수 있었다.

#### 감사의 글

본 연구에서 사용한 뇌파는 한국표준과학연구원에서 측정된 것이며, 본 연구는 대학기초연구 과제의 지원으로 이루어졌음을 밝힙니다.

#### 참고문헌

- [1] 박해정, 박광석, 권준수, “바이스펙트럼과 상관차원을 이용한 정신분열증 환자의 공간적 뇌파 분석”, 추계학술, 제16권, 제2호, pp.138-141, 1994.
- [2] 한선호, 사이토 쇼지, “임상뇌파”, 일조각, 서울, 1987.

- [3] 류창수, 김승환, 박선희, 이임갑, 김지은, 손진훈, “시각자극에 의한 긍/부정 감성 상태에서 측정된 뇌파에 대한 시간-주파수 분석”, 감성과학회 학술대회, pp.98-101, 1997.
- [4] 류창수, 김승환, 박선희, 황민철, “청각 자극에 의한 감성상태의 뇌파에 대한 상관차원 추정”, 한국정보과학회, 제25권, 제2호, pp.408-416, 1998.
- [5] 최정미, “뇌전위의 물리적 모델링과 비선형분석에 의한 뇌기능연구”, 한국과학기술원 석사학위논문, 1997.
- [6] 최정미, 배병훈, 김수용 “단속주파수를 변화시킨 청각자극에 반응하는 뇌전위신호의 카오스분석”, 대한의용생체공학, 제15권, 제3호, pp.237-243, 1994.
- [7] 최정미, 배병훈, 김수용 “비선형 구동계의 바이스펙트럼에 의한 효과적인 혼돈제어 알고리즘”, 한국물리학회, Vol.35, No.4, pp.457-467, 1995.
- [8] 황민철, “감성의 정량적 정성적 평가”, 측정표준, 제19호, pp.32-40, 1996.
- [9] 김기봉, “반데이폴-더핑 진동자에서의 카오스: 바이스펙트럼 해석”, 한국과학기술원, 박사학위논문, 1996.
- [10] 장경영, 김경조, “바이스펙트럼해석을 이용한 혈관의 비선형 전파특성의 계측”, 추계학술대회, 제16권, 제2호, 1994.
- [11] A. Babloyantz, J. M. Salazar, and C. Nicolis, “Evidence of chaotic dynamics of brain activity during the sleep cycle”, Phys. Lett. A, vol.111, pp.152-156, 1985; A. Babloyantz and A. Destexhe, “Low-dimensional chaos in an instance of epilepsy”, Proc. Natl. Acad. Sci. USA, Vol.83, pp.3513-3517, 1986.
- [12] Chrysostomos L. Nikias, Athjina P. Petropoulos, “Higher Order Spectra Analysis”, Prentice-Hall, 1993.
- [13] Chrysostomos L. Nikias and Jerry M. Mendel, “Signal Processing with Higher-Order Spectra”, IEEE Signal Processing Magazine, 1993.
- [14] Sanyogita Shamsunder and Georgios B.Giannakis, “Detection and Parameter Estimation of Multiple Non Gaussian Sources via Higher Order Statistics”, IEEE Transaction on Signal Processing, Vol.42, No.5, 1994.
- [15] Y.S.Cho and E.J.Powers, “Quadratic System Identification Using Higher Order Spectra of I.I.D. Signal”, IEEE Transaction on Signal Processing, Vol.42, No.5, 1994.
- [16] Charsostomos L.Nikas and Mysore R. Raghuvver, “Bispectrum Estimation : A Digital Signal Processing Framework”, Proceedings of the IEEE, Vol.75, No.7, 1987.
- [17] Haejeong Park, Kwangsuk Park, “A Study on the Non-linear Characteristics of EEG Using Bispectral Analysis”, 춘계학술대회, 제16권, 제1호, 1994.
- [18] J.M.Choi, B.H.Bae, B.K.Min, S.Y. Kim, “The Analysis of Brain Activity in Wakefulness and deep Sleep states from a dog EEG”, Korean Physical Society, Vol.30, No.2, pp.328-331, 1997.
- [19] T.P Barneet, L.C Johnson, P.Na-itoh, N.Hicks and C. Nute “Bispectrum Analysis of Electroencephalogram Signal during Waking and Sleeping”, SCIENCE, Vol.172, 1971.