

AR 모델에 의한 視覺 誘發電位の Bicoherence分析에 관한 研究

유병욱 · 정명진 · 황수용* · 최갑석

=Abstract=

A Study on the Bicoherence Analysis of Visual Evoked Potential based on AR Model

Byong-Wook Yoo, Myong-Jin Jung, Soo-Yong Hwang*, Kap-Seok Choi

In this paper the harmonic degrees between α wave and β wave in visual evoked potential are analyzed by the bicoherence. The bicoherence analysis is based on an AR model which provides significantly better resolution than that of Fourier transform.

The analysis results of visual evoked potential are compared with the analysis results of background EEG. From the comparison results it is found that the harmonic degree of visual evoked potential is less than the harmonic degree of background EEG and the β wave of visual evoke potential unlike the background EEG contains the non-harmonic property of α wave more than the harmonic property

1. 序 論

인간의 大腦皮質에서는 불규칙한 전위의 변동현상이 일어난다. 이러한 변동현상을 전기적인 신호로 측정된 것을 腦波(electroencephalogram : EEG)라 한다¹⁾.

정상인의 각성·폐안·안정상태에서 後頭部, 頭頂部에 導出した 腦波는 크기가 수십 마이크로 볼트 [μV]이며 δ -波(1~3.99Hz), θ -波(4~7.99Hz), α -波(8~12.99Hz), β -波(13Hz~)으로 나눌 수 있으며 8~12Hz의 규칙적인 律動을 나타내는 경우가 많으므로 주성분은 α -波로 알려져 있다²⁾.

腦波의 형태는 사람에 따라 다르지만 대부분의 경우 일정 형태를 유지하고 있다. 그러나 腦波는 완전한 의미에서 複合週期波가 아니므로, 腦는 線形振動子の 집합체가 아니라 非線形振動子の 집합체로 볼수 있다. 그리고 非線形振動子是 基本數 뿐만 아니라 그에 대한 高調波 성분도 발생 시키므로 背景腦波에서 α -波의 周波數를 基本周波數로 한 경우에 해당되는 성분이 β -波중에 포함되어 있고 α -波와 β -波 사이에 調和程度가 다른 波 보다 크다고 알려져 있다^{3,4)}.

視覺 誘發電位에서 α -波와 β -波 사이의 調和程度를 신호의 조화관계가 있는 성분들에 대하여 정보를 제공하는 bispectrum을 이용한 bicoherence로 분석하여 背景腦波와 비교함으로써 視覺 誘發電位에서 α -波와 β -波의 調和程度를 고찰하였다. 腦波의 bicoherence 分析시 종래의 Fourier 방법 보다 연

〈접수 : 1987년 12월 15일〉

명지대학교 전자공학과

Dept. of Electronic Eng., Myunggi University

* 경기개발대학 전자공학과

* Dept. of Electronic Eng., Kyungki Open College

산속도가 빠르고 해상도가 우수한 AR 모델에 의해 bicoherence 分析을 하였다.

2. Bicoherence의 定義와 性質

임의의 신호 $y(t)$ 에 대한 2차 상관함수 $R(\tau)$ 의 Fourier 변환을 파워 스펙트럼이라 하며 3차 상관함수 $R(\tau_1, \tau_2)$ 의 Fourier 변환을 bispectrum이라 한다. 그리고 bicoherence는 bispectrum을 파워스펙트럼으로 정규화한 것이다. 3차 상관함수와 bispectrum을 식으로 나타내면 다음과 같다.

$$R(\tau_1\tau_2) = E\{y(t)y(t+\tau_1)y(t+\tau_2)\} \quad (1)$$

$$B(w_1, w_2) = \int_{-\tau_1}^{\tau_1} \int_{-\tau_2}^{\tau_2} R(\tau_1, \tau_2) \exp\{-j(w_1\tau_1 + w_2\tau_2)\} d\tau_1 d\tau_2 \quad (2)$$

$y(t)$ 를 Cramer 스펙트럼 표현으로 나타내면

$$y(t) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\pi}^{\pi} \exp(iwt) dz(w) \quad (3)$$

이다. 여기서 $dz(w)$ 는 random orthogonal increment measure이고 다음과 같은 성질을 갖는다.

$$E\{dz(w)\} = 0 \\ E\{dz(w)\} = S(w)dw \quad (4)$$

$$dz(w) = dz^*(-w)$$

여기서 $S(w)$ 는 $y(t)$ 의 파워 스펙트럼이다. 그리고

$$E\{dz(w_1) dz(w_2)\} = \begin{cases} S(w_1)dw_1, & \text{단, } w_1 + w_2 = 0 \\ 0 & \text{단, } w_1 + w_2 \neq 0 \end{cases} \quad (5)$$

이며

$$E\{dz(w_1)dz(w_2)dz(w_3)\} = \begin{cases} B(w_1, w_2) dw_1 dw_2 & \text{단, } w_1 + w_2 + w_3 = 0 \\ 0 & \text{단, } w_1 + w_2 + w_3 \neq 0 \end{cases} \quad (6)$$

이다.

즉, bispectrum은 각 周波數의 합이 영인 세개의 Fourier 성분들의 곱으로 나타낼 수 있다.

$y(t)$ 가 定常過程이고 영 평균이라면 $R(\tau_1, \tau_2)$ 는 대칭성을 갖으므로 $B(w_1, w_2)$ 도 다음과 같은 대칭성을 갖는다.

$$B(w_1, w_2) = B(w_1, w_2) = B(w_1, -w_1 - w_2) \\ = B(w_2, -w_1 - w_2) = B(-w_1 - w_2, w_2) \quad (7)$$

bicoherence는 bispectrum을 파워스펙트럼으로 정규화한 것으로 bispectrum과 같은 대칭성을 갖으

며 식으로 나타내면 다음과 같다.

$$BC(w_1, w_2) = B(w_1, w_2) / \sqrt{S(w_1)S(w_2)S(w_1 + w_2)} \quad (8)$$

3. AR 모델에 의한 視覺 誘發電位の bicoherence

腦波는 완전한 의미에서 復合週期波는 아니다. 그러나 성인의 경우 각성폐안 안정시 後頭部, 頭訂部에서 導出한 腦波의 波形은 8~12Hz의 규칙적인 律動을 나타나는 경우가 많다. 波의 형태는 사람에 따라 다르지만 대부분의 경우 일정 형태를 유지하고 있다. α 波의 波形을 규칙적이라 하면 α 波를 基本波로 한 경우 그 高調波에 해당되는 성분이 β 波 중에 포함되어 있다는 것을 암시하고 있다.

또한 視覺 자극에 의해 생기는 誘發電位는 α -블리킹 현상이 생긴다. 이것은 α 波의 감소에 수반하여 β 波가 상대적으로 증가하는 현상이다. 따라서 bicoherence는 신호의 周波數 성분간, 특히 조화관계가 있는 성분들에 대하여 정보를 제공하므로 視覺 자극에 의한 誘發電位에서 α 波와 그의 高周波와의 관계를 bicoherence로 分析할 수 있다⁵⁾.

AR 모델로 부터 bicoherence을 구하기 위하여 먼저 다음과 같은 시스템을 생각한다.

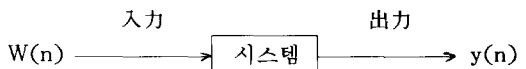


Fig. 1. Discrete system model

시스템의 입력을 $W(n)$ 을 nongaussian white noise (NGWN)이라고 가정하고 시스템의 임펄스 응답을 $h(n)$ 이라고 출력 $y(n)$ 은 같다.

$$y(n) = \sum_{k=-\infty}^{\infty} h(k)W(n-k) \quad (9)$$

여기서 $E\{W(n)\} = 0$, $E\{W^2(n)\} = \sigma w$, $E\{W^3(n)\} = \beta = 0$ 이다. 그리고 $y(n)$ 이 3차 안정성 (third order stationarity)이라면 $y(n)$ 의 3차 모멘트 시퀀스(third moment sequence)는 다음과 같다.

$$R_y(m, n) = E\{y(1)y(1+m)y(1+n)\} \\ = E\left\{\sum_{k=-\infty}^{\infty} h(k)W(\ell-k) \times \sum_{s=-\infty}^{\infty} h(s)W(\ell+m-s) \right. \\ \left. \sum_{t=-\infty}^{\infty} h(t)W(\ell+m-t)\right\} = \sum_{k=-\infty}^{\infty} \sum_{s=-\infty}^{\infty} \sum_{t=-\infty}^{\infty} h(k) \\ h(s)h(t)\beta \times \delta(n-s+k, n-t+k) \quad (10)$$

$$\delta(p, q) = \begin{cases} 1 & p=q=0 \\ 0 & \text{그 외} \end{cases}$$

$y(n)$ 의 bispectrum $By(w_1, w_2)$ 은 정의에 의하면 다음과 같다⁶⁾.

$$By(w_1, w_2) = \sum_m \sum_n Ry(m, n) \exp[-j(w_{1m} + w_{2n})] \\ = \sum_{k=-\infty}^{\infty} \sum_{s=-\infty}^{\infty} \sum_{t=-\infty}^{\infty} h(k)h(s)h(t) \exp[-j\{w_1(s-k) + w_2(t-k)\}] = \hat{\beta} H(w_1)H(w_2)H^*(w_1 + w_2), \quad (11)$$

$$H(w) = \sum_{k=-\infty}^{\infty} h(k) \exp(-jk)$$

만약 그림1의 시스템을 다음과 같은 p 차 AR모델식으로

$$y_n + \sum_{i=1}^p a_i y(n-i) = Wn \quad (12)$$

나타낼 수 있다면 식 (11)의 $H(w)$ 는

$$H(w) = \frac{H(w)}{1 + \sum_{i=1}^p a_i \exp(-jw \Delta t i)} \quad (13)$$

이다. 여기서 Δt 는 샘플링 주기이다. 그리고 $By(w_1, w_2)$ 의 크기와 위상은 다음과 같다.

$$|By(w_1, w_2)| = |H(w_1)| |H(w_2)| |H(w_1 + w_2)| \quad (14)$$

$$\psi(w_1, w_2) = \phi(w_1) + \phi(w_2) - \phi(w_1 + w_2) \quad (15)$$

그리고 식(12)의 y_n 역시 3차 안정성이므로 다음과 같은 식을 만족하여야 한다.

$$Ry(-k, -\ell + \sum_{i=1}^p a_i Ry(i-k, i-\ell)) = 0, \quad \ell > 0 \quad (16)$$

만약 $k=1$ 이고 $i=0, \dots, p$ 이라면 식(16)은

$$Ry A = B \quad (17)$$

이 된다. 여기서

$$Ry = \begin{bmatrix} R(0, 0) & R(1, 1) & \dots & R(p, p) \\ R(-1, -1) & R(0, 0) & \dots & R(p-1, p-1) \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ R(-p, -p) & R(-p+1, -p+1) & \dots & R(0, 0) \end{bmatrix}$$

$$A = [1, a_1, a_2, \dots, a_p]$$

$$B = [\hat{\beta}, 0, 0, \dots, 0]$$

이다.

따라서 AR모델의 出力 신호에 대한 3차 모멘트 시퀀스 $R(k, k)$ ($k=0, +1, +2, \dots, +p$)을 알고 모델의 入力의 skew을 안다면 식(13), (14), (15), (17)로부터 모델의 出力 신호에 대한 bispectrum을 추정할 수 있다.

또한 bicoherence는 bispectrum을 파워스펙트럼으로 정규화시켜 얻을 수 있으며 식으로 나타내면 다음과 같다⁷⁾.

$$BC(w_1, w_2) = \frac{By(w_1, w_2)}{\sqrt{P(w_1)P(w_2)P(w_1 + w_2)}} \quad (18)$$

여기서 $P(w)$ 은 AR모델로 구한 파워스펙트럼이다. 식(18)의 bicoherence의 값은 증래의 bicoherence와 달리 1보다 큰 값을 갖을 수 있는데 그것은 $By(w_1, w_2)$ 와 $P(w)$ 는 각각 다른 예측계수들로 구했기 때문이다.

4. 實驗 및 檢討

4-1. Bicoherence 分析 시스템

視覺 誘發電位の bicoherence 分析을 하기 위하여 構成한 시스템 계통도는 Fig. 2과 같다. Fig. 2의 電極接續部는 腦의 전기활동을 電極으로 導出하여 증폭기로 入力시키는 기능과 電極간의 저항을

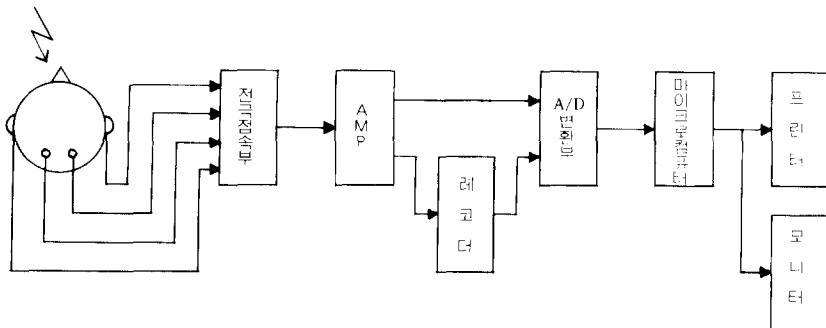


Fig. 2. System diagram for the bicoherence analysis of VEP.

측정할 수 있는 기능을 갖춘 電極박스(5117 Electrode box, 日本 三榮社)를 이용하였다.

본 실험에서는 腦波를 10/20 電極배치법에 준한 單極導出법으로 導出하였으며 電極과 頭皮간의 접촉저항은 15[KΩ] 미만이 되어야 하고 電極간의 저항은 30[KΩ] 미만이 되어야 한다. 이를 위하여 電極을 식염수에 적신 면과 電極물을 사용하여 장착하였다. 電極은 不分極性인 염화은(AgCl)로 만든 원판형 電極(disk electrode)를 사용하였다.

腦波의 전기적인 현상은 신호레벨이 낮고 외부로부터 전기적 방해받기 쉬우므로 腦波의 증폭기는 불필요한 외부잡음을 제거하기 위한 필터가 필요하다. 腦派는 [μV]단위의 크기이며 생체에서의 전류는 $10^{-7} \sim 10^{-8}$ [A] 정도이므로 증폭기의 입력 임피던스는 50[MΩ] 이상 되어야 하며 A/D 변환부에 入力되기 위해서는 증폭기의 증폭비는 120[dB] 이상 되어야 한다. 腦派의 周波數는 30[Hz] 미만이므로 필터의 차단 周波數가 30[Hz]인 서역통과 필터가 필요하다⁸⁾. 따라서 본 실험에서는 이러한 조건을 갖춘 4채널 生體信號 記錄器 360시스템(日本 三榮社)을 사용하였다. Fig. 1의 레코더는 4개의 신호를 동시에 보관할 수 있는 4채널 레코더이며 A/D 변환부는 증폭기로부터 出力되는 아나로그 신호를 디지털 신호로 변환하여 컴퓨터에 入力시키기 위한 것으로서 A/D 컨버터는 12비트 A/D 컨버터 MD 574A를 사용하였고 腦波의 周波數가 30[Hz] 미만이므로 7.81×10^{-3} [sec]로 표본화 하였다. 사용한 컴퓨터는 IMB-PC/AT 호환기종인 마이크로 컴퓨터이며 프린터는 Epsilon사의 LQ1500기종을 사용하였

다.

4-2. 視覺 誘發電位の bicoherence 分析

(1) 시뮬레이션에 의한 AR모델의 차수 설정

AR모델의 bicoherence 分析시 모델의 최적차수를 결정하여야 하지만 모델의 최적차수 방법이 아직 없다. 따라서 본 연구에서는 시뮬레이션에 의해서 설정하였다. 이 경우 bicoherence는 두개의 周波數간의 調和程度를 나타내므로 시뮬레이션에 사용한 함수는 다음과 같다.

$$y(t) = \sum_{i=1}^2 \cos(2\pi f_i t + \phi_i) + e(t) \quad (19)$$

여기서 $f_1=5\text{Hz}$, $f_2=10\text{Hz}$ 이고 ϕ_1 은 $[0, 2\pi]$ 사이의 불규칙 변수이며 $\phi_2=2 \times \phi_1$ 이다. 그리고 $e(t)$ 는 잡음이며 $y(t)$ 에 비해서 -30dB 정도의 크기이다. Fig. 3, 4, 5는 차수를 10, 12, 14로 하였을 때, $y(t)$ 의 bicoherence을 도시한 것이다. 그림에서 알 수 있듯이 차수가 12에서 정확한 bicoherence 分析이 되어지고 있다. 따라서 AR모델에 의한 視覺 誘發電位の bicoherence 分析시에 모델의 차수를 12차로 설정하였다.

(2) 視覺 誘發電位の 檢出 및 處理

視覺 誘發電位를 검출하기 위하여 정상성인(남자 10명; 24세~27세)을 밀폐된 암실에서 눈을 감기고 편안한 상태로 놓인 다음 10~20 電極配置法으로 電氣的으로 不活性인 귀불(A_1 , A_2)과 視覺刺戟에 가장 민감한 반응이 나타나는 後頭部(O_1 , O_2)에 電極을 부착하고 광도 0.5Lux의 포토스티몰레이트와 실

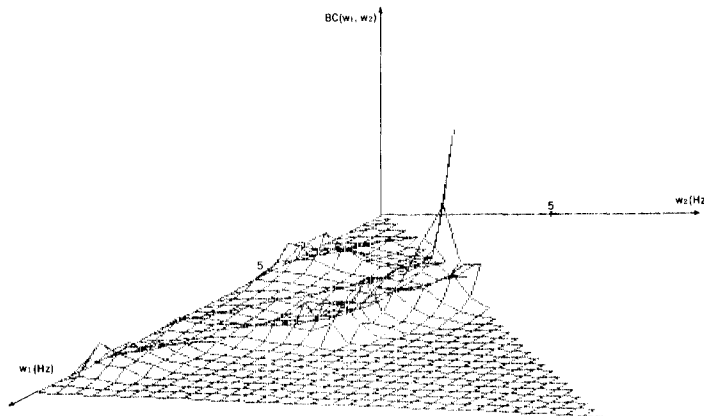


Fig. 3. Bicoherence estimate at the 10th order

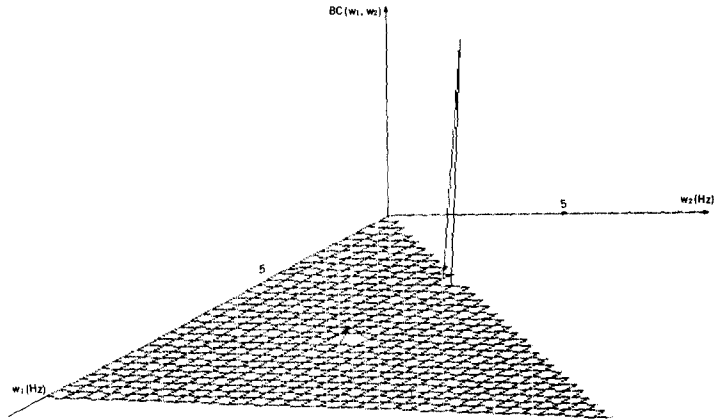


Fig. 4. Bicoherence estimate at the 12th order

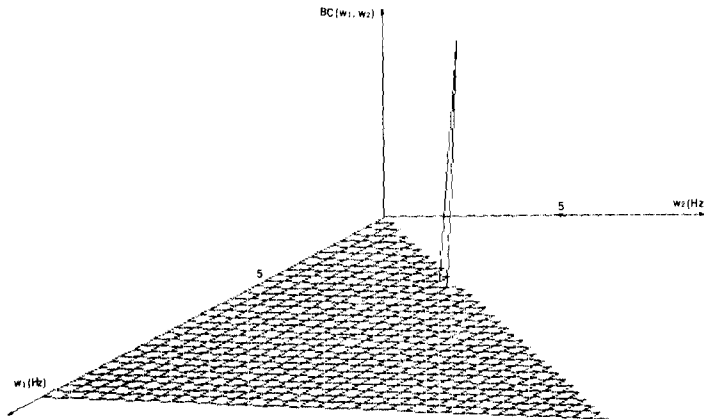


Fig. 5. Bicoherence estimate at the 14th order

협대상인과의 거리는 30(cm)로 하여 刺戟 간격을 1 초로 하여 視覺刺戟을 가했다.

이와 같이 검출된 腦波 데이터처리 과정은 다음과 같다.

1. 모델의 차수를 선택한다
2. 30초간의 샘플된 腦波데이터를 얻는다.
3. 과정 2에서 얻은 데이터를 한 구간의 데이터가 128개로 하여 30구간으로 나눈다.
4. 30구간에 대한 평균 3차 모멘트를 구한다
5. 평균 3차 모멘트를 식(15)에 대입하여 예측계수 A_i 를 구한다.
6. 과정 5에서 구한 A_i 를 식(11)에 대입하여 식(16)으로부터 bicoherence의 크기와 위상을 구한다.

이와 같은 처리과정을 흐름도로 나타내면 Fig. 6과 같다.

(3) 結果 및 考察

被檢者A로 부터 視覺 誘發電位와 背景腦波를 Fig. 7, 8와 같이 각각 검출하였다. Fig. 7, 8은 일부를 나타낸 것이다. Fig. 9, 10은 Fig. 7, 8의 파워스펙트럼이다. Fig. 9, 10에서 보는 바와 같이 α 波는 背景腦波에서 더 큰 값을 갖고 β 波는 視覺誘發電位에서 더 큰 값을 갖는다. 즉 視覺 誘發電位에서는 α 波가 감소하고 β 波가 증가하는 α -블러킹 현상이 나타남을 알 수 있다.

視覺 誘發電位에서 α 波와 β 波의 調和程度를 알아보기 위하여 Fig. 7의 視覺 誘發電位를 Fig. 6의

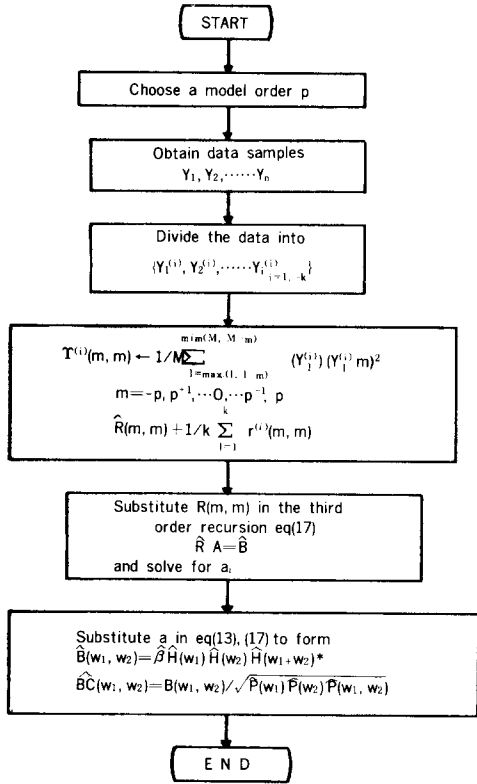


Fig. 6. Flow chart of processing the data

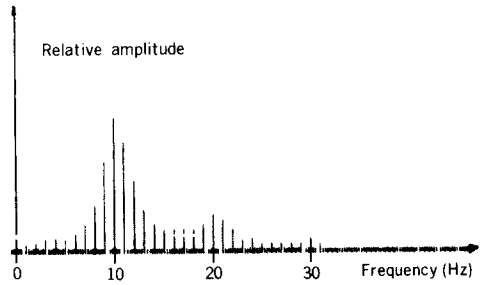


Fig. 9. Power spectrum of VEP

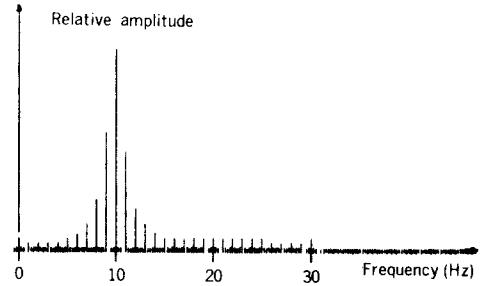


Fig. 10. Power spectrum of background EEG

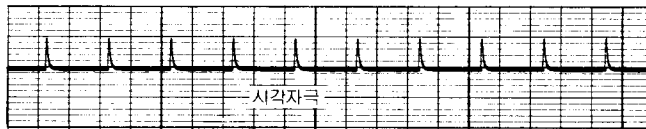
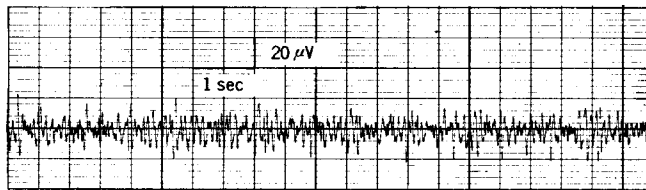


Fig. 7. Visual evoked potential

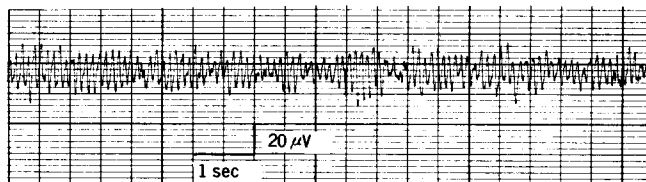


Fig. 8. Background EEG

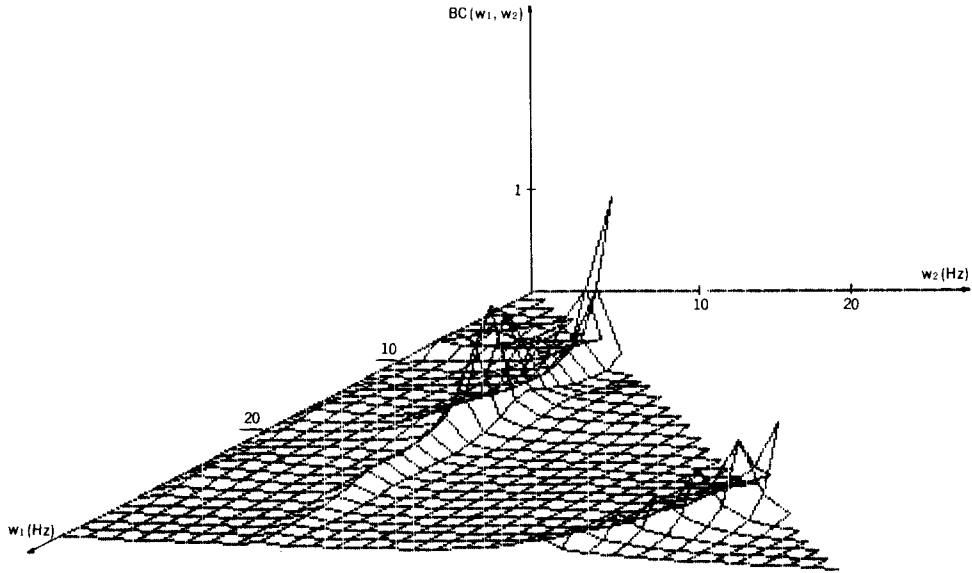


Fig. 11. Bicoherence estimates of VEP

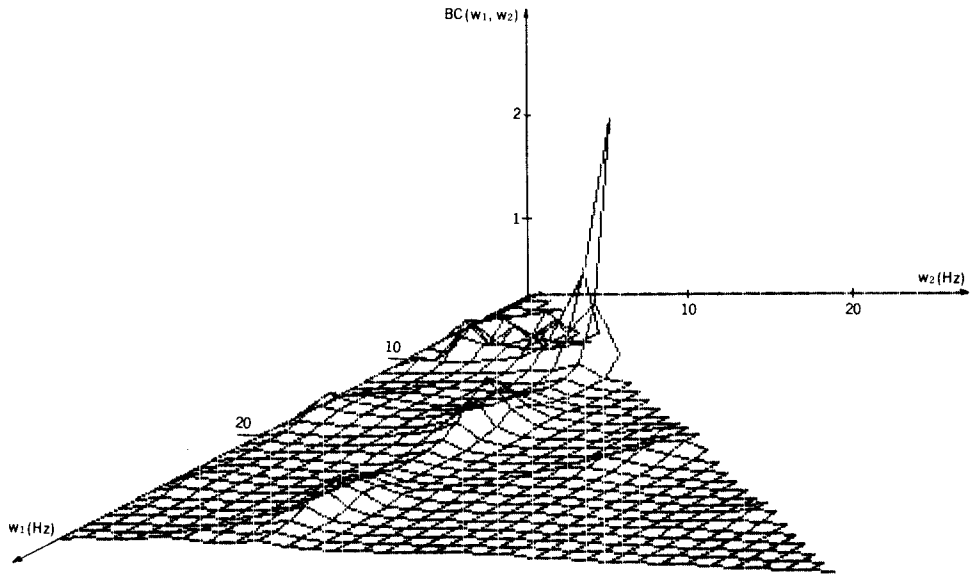


Fig. 12. Bicoherence estimates of background EEG

처리과정에 의하여 처리하였으며 처리된 결과를 Fig. 11에 나타내었다.

또한 視覺 誘發電位에서의 調和程度를 背景腦波의 調和程度와 비교하기 위하여 Fig. 8의 背景腦波를 Fig. 6의 처리과정에 의하여 처리된 결과를 Fig.

12에 나타내었다. 만약 背景腦波에서의 α 波와 β 波의 調和程度가 視覺 誘發電位에서 그대로 유지된다면 視覺 誘發電位에서의 Bicoherence값은 背景腦波의 Bicoherence값과 동일하여야 한다.

그러나 Fig. 11의 값들을 Fig. 12의 값보다 작다.

Table 1. The power spectrum centesimal rates and bicoherence estimates for 10 subject

피검자	α 파	β 파	배경뇌파의 bicoherence	시각유발전위의 Bicoherence
A	0.68	3.5	1.71	0.98
B	0.71	2.6	0.93	0.53
C	0.82	2.1	2.42	0.92
D	0.64	2.8	3.21	1.57
E	0.76	3.1	2.70	1.27
F	0.83	2.4	0.87	0.43
G	0.70	2.1	0.88	0.46
H	0.80	2.6	3.61	1.76
I	0.73	2.9	0.98	0.47
J	0.86	2.3	1.61	0.86

이것은 視覺 誘發電位에서는 α 波와 β 波의 調和程度가 背景腦波에서 보다 낮은 것을 의미한다. 다음 표는 被檢者 10명에 대하여 背景腦波의 파워스펙트럼을 기준으로 했을 때 視覺 誘發電位の α 波, β 波의 파워스펙트럼 백분율과 背景腦波와 視覺 誘發電位の Bicoherence를 나타낸 것이다.

Table 1에서 보는 바와 같이 α 波의 감소율과 β 波의 증가율은 개인차는 있으나 모든 被檢者는 視覺刺戟에 대하여 α -블러킹 현상을 나타냈다.

被檢者 A, D, E, H 경우 視覺 誘發電位の bicoherence값이 被檢者 B, F, G의 背景腦波의 bicoherence 값 보다는 큰 값으로 나타났다. 이러한 현상으로 부터 α 波와 β 波의 調和程度는 개인에 따라 차가 큰 것으로 판단된다.

그러나 각 개인별로 살펴보면, 背景腦波에 비해 視覺 誘發電位에서는 β 波가 α 波의 高調波 성질보다 非高調波 성질이 더 많은 것으로 판단 된다.

5. 結 論

視覺 誘發電位에서 α 波와 β 波 사이의 調和程度를 알아보기 위해서 視覺 誘發電位를 AR모델에 의한 bicoherence로 분석하였는 바, 다음과 같은 결과를 얻었다.

視覺 誘發電位の bicoherence값이 背景腦波의 bicoherence값보다 작게 나타났으며 背景腦波에 비하면 視覺 誘發電位에서는 α 波가 β 波의 高調波 성질 보다는 非高調波 성질이 더 많은 것으로 확인되었다.

참 고 문 헌

- 1) Bunichi Fujimori M. D, "Analysis of Electrical Phenomena of the Brain, Method and their Application", Igaku Shoin Ltd., 1966.
- 2) L. G. Kiloh, A. J. McComas, "Clinical Electroencephalography", pp. 64~87, Butterworths Ltd., 1981.
- 3) 中澤一雄·川人光男外 "α波를發生する振動子の非線形的性質", 醫用電子と生體工學, Vol. 29, No. 1, 1985.
- 4) 館嶂·高谷治 "バイ 스펙트럴によるα波 波形의解析", 醫用電子と生體工學, Vol. 11, No. 4, pp. 44~52, 1985.
- 5) G. Dumermuth. P. J. Huber. B. Kleiner, TH. Gasser. "Analysis of the interrelations between frequency bands of the EEG by means of the Bispectrum a preliminary a study", Electroenceph. clin. Neurophysiol., vol. 31, pp. 117~147, 1971.
- 6) Mysore R. Raghuvver., Chrysostomos L. Nikias, "Bispectrum Estimation ; A Parametric Approach", IEEE Trans. on ASSP, vol ASSP-33, No. 4, pp. 1213~1230, 1985.
- 7) Mysore R. Raghuvver., Chrysostomos L. Nikias, "Bispectrum estimation via AR modeling", signal Processing, vol. 10, pp. 35~48, 1986.
- 8) 崔甲石 "EEG 計測 시스템과 信號처리", 電子工學會誌 - 醫工生體工學 특집, Vol. 13, No. 3, pp. 20~28, 1986.