

비선형계의 응용을 위한 Bispectrum의 컴퓨터 시뮬레이션

(Computer Simulation of Bispectrum for the Application of
Non-linear System)

오 재응, 정 준희, 이 정철, 엄 성하
(한양대학교)

1. 서론

신호처리 기법으로 선형계에는 파워스펙트럼이 널리 사용되었다. 선형계에 대한 파워스펙트럼 해석법은 수학적으로나 통계학적으로 잘 알려져 여러 분야에서 사용되었으며 계속장비도 이를 기준으로 발달하였다. 그러나 시스템이 비선형계인 경우에 파워스펙트럼을 적용하는 것은 문제가 있다. 비선형은 시스템 자체가 비선형성을 갖고 있어서 입력과 시스템 응답사이에 비선형이 있는 경우와 시스템의 공진 모드드사이에서 발생하는 비선형 상호작용등이 있다. 이런 경우 고차스펙트럼 해석이 비선형 진동현상을 조사하는데 필요하다. 고차스펙트럼은 종래의 선형스펙트럼해석의 확장이다. 파워스펙트럼에서의 Auto-spectrum과 Cross-Spectrum은 가장 낮은 차수의 스펙트럼을 이용한 것으로 두개의 스펙트럼 성분상호간의 통계적인 관계를 나타내는 것이다. 고차스펙트럼의 그 다음 차수의 확장이 Bispectrum으로 각각의 스펙트럼성분의 주파수 합이 0으로 되는 세개의 주파수 성분으로 나타나기 때문에 3개의 주파수에 대하여 여러가지 조합의 형태를 가질수 있어서 주파수 성분상호간의 다양한 통계적 관계를 나타내게 된다. 따라서 Bispectrum 해석기법은 세개의 주파수 성분사이의 비선형진동현상이나 복합공진모드, 2차성모드(quadratic mode), 연성(Coupling) 등을 조사하는데 매우 유용하다. 본 논문에서는 파워스펙과 Bispectrum의 차이를 이론적으로 비교 검토하고 파워스펙트럼에서는 알 수 없었던 주파수 성분간의 간섭 및 시스템의 비선형성등을 컴퓨터 시뮬레이션을 통하여 Bispectrum해석법의 물리적인

의미와 그 타당성을 규명하고자 한다.

시뮬레이션에 사용한 데이터는 주파수에서 Harmonic Order를 갖는 회전기기의 특성을 기준으로 한다.

2. 이론 해석

2.1 파워스펙트럼과 고차스펙트럼

평균치를 0으로 하는 정상확률과정(Stationary Stochastic Process)인 $X(t)$ 의 파워스펙트럼은 2차 자기상관함수의 푸리에변환으로서

으로 표시된다. 여기서 자기상관함수는 확률과정 $X(t)$ 의 2차 모멘트의 평균치로서

$$R(\tau) = E[X(t)X(t+\tau)] \quad (2)$$

으로 표시되고 $R(\tau)$ 는 기대치 값을 나타낸다. 또한 상관함수 $R(\tau)$ 는 파워스펙트럼 $S(\omega)$ 의 푸리에 역변환을 취하면 쉽게 구해진다.

$$R(\tau) = \int_{-\infty}^{\infty} S(\omega) \exp(j\omega\tau) d\omega \quad (3)$$

실제에 있어서의 파워스펙트럼의 값은 절대치를 제공한 값을 사용한다. 한편 정상과정일 때의 $X(t)$ 를 Fourier-Stieltje 적분의 형태로서 표시할 수 있다.

$$X(t) = \int_{-\infty}^{\infty} \exp(j\omega t) dZ(\omega) \quad (4)$$

식(4)를 식(2)에 대입하면 다음과 같이 표시할 수 있다.

$$R[dZ(\omega_1)dZ(\omega_2)] = \delta(\omega_1 + \omega_2)S(\omega)d\omega \quad (5)$$

여기서 δ 는 델타함수이다. 이 델타함수는 두개의 주파수 성분 ω_1, ω_2 에 대하여

$$\begin{aligned} \omega_1 + \omega_2 = 0, \delta(\omega_1 + \omega_2) = 1, R[dZ(\omega_1)dZ(\omega_2)] &= S(\omega)d\omega \\ \omega_1 + \omega_2 \neq 0, \delta(\omega_1 + \omega_2) = 0, R[dZ(\omega_1)dZ(\omega_2)] &= 0 \end{aligned} \quad (6)$$

으로 된다. 시간영역에서의 이 과정은 본산 $B[X^2(t)]$ 에 해당되며 다음과 같은 식으로 나타낼 수 있다.

$$B[X^2(t)] = R(0) = \int_{-\infty}^{\infty} S(\omega)d\omega \quad (7)$$

따라서 파워스펙트럼은 시간영역에서의 대안 각 주파수 성분으로 부터의 기여정도를 표시하고 있는 것이다.

같은 방법으로 $(n-1)$ 차원의 n 차 모우먼트 스펙트럼은 다음과 같이 표시할 수 있다.

$$\begin{aligned} S_n(\omega_1, \omega_2, \dots, \omega_n) \\ = (2\pi)^{-(n-1)} \int_{-\infty}^{\infty} \dots \int_{-\infty}^{\infty} R(\tau_1, \tau_2, \dots, \tau_{n-1}) \\ \exp(-j(\omega_1\tau_1 + \omega_2\tau_2 + \dots + \omega_{n-1}\tau_{n-1})) d\tau_1 d\tau_2 \dots d\tau_{n-1} \end{aligned} \quad (8)$$

여기서 $R_n(\tau_1, \tau_2, \dots, \tau_{n-1})$ 은 확률과정 n 차 모우먼트의 평균치로서

$$\begin{aligned} R_n(\tau_1, \tau_2, \dots, \tau_{n-1}) \\ = R[X(t)X(t+\tau_1) \dots X(t+\tau_{n-1})] \\ = \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{T} \int_{-T/2}^{T/2} X(t)X(t+\tau_1) \dots X(t+\tau_{n-1}) dt \end{aligned} \quad (9)$$

로 표현된다. 또한 R_n 은 S_n 의 푸리에 역변환에 의해서 다음과 같이 구해진다.

$$\begin{aligned} R_n(\tau_1, \tau_2, \dots, \tau_{n-1}) \\ = \int_{-\infty}^{\infty} \dots \int_{-\infty}^{\infty} S_n(\omega_1, \omega_2, \dots, \omega_{n-1}) \\ \exp(j(\omega_1\tau_1 + \omega_2\tau_2 + \dots + \omega_{n-1}\tau_{n-1})) d\omega_1 d\omega_2 \dots d\omega_{n-1} \end{aligned} \quad (10)$$

스펙트럼해석과 마찬가지로 식(4)를 식(10)에 대입하면

$$\begin{aligned} R[dZ(\omega_1)dZ(\omega_2), \dots, dZ(\omega_{n-1})] \\ = \delta(\omega_1 + \omega_2 + \dots + \omega_n) \\ S_n(\omega_1 + \omega_2 + \dots + \omega_{n-1}) d\omega_1 d\omega_2 \dots d\omega_{n-1} \end{aligned} \quad (11)$$

으로된다. 이 식은 주파수에서의 n 개의 푸리에 계수곱으로 $dZ(\omega_1)dZ(\omega_2) \dots dZ(\omega_n)$ 의 평균을 표시하고 $\omega_1 + \omega_2 + \dots + \omega_n$ 의 전체함에 대하여 다음과 같이 된다.

$$\begin{aligned} \omega_1 + \omega_2 + \dots + \omega_n = 0, \\ R[dZ(\omega_1)dZ(\omega_2), \dots, dZ(\omega_{n-1})] \\ = S_n(\omega_1 + \omega_2 + \dots + \omega_{n-1}) d\omega_1 d\omega_2 \dots d\omega_{n-1} \\ \omega_1 + \omega_2 + \dots + \omega_n \neq 0, \\ R[dZ(\omega_1)dZ(\omega_2), \dots, dZ(\omega_{n-1})] = 0 \end{aligned} \quad (12)$$

또 식(10)으로 부터

$$\begin{aligned} R_n(0, 0, \dots, 0) \\ = \int_{-\infty}^{\infty} \dots \int_{-\infty}^{\infty} S_n(\omega_1 + \omega_2 + \dots + \omega_{n-1}) d\omega_1 d\omega_2 \dots d\omega_{n-1} \end{aligned} \quad (13)$$

으로 되고 식(13)은 $(n-1)$ 차원 스펙트럼은 $(n-1)$ 개의 주파수 전영역에 대하여 적분한 과정 $X(t)$ 의 n 차 모우먼트의 평균치를 표시하고 있다.

2.2 Bispectrum해석

지금까지 설명한 식(13)으로 부터 시계열 데이터의 3차 모우먼트에 대한스펙트럼을 Bispectrum이라 부른다. 여기서는 파워스펙트럼과 Bispectrum을 비교설명한다. $X(t)$ 를 스펙트럼 $S(\omega)$ 와 Bispectrum $B(\omega_1, \omega_2)$ 를 갖는 정상 랜덤 과정이라고 가정하면 $S(\omega)$ 와 $B(\omega_1, \omega_2)$ 는 평균제곱 $R(\tau)$ 와 평균 제곱 $C(\tau_1, \tau_2)$ 의 향으로 각각 정의된다.

$$\begin{aligned} S(\omega) &= \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} R(\tau) \exp(-j\omega\tau) d\tau \\ B(\omega) &= \frac{1}{(2\pi)^2} \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} C(\tau_1, \tau_2) \exp(-j(\omega_1\tau_1 + \omega_2\tau_2)) d\tau_1 d\tau_2 \end{aligned} \quad (14)$$

$$\begin{aligned} R(\tau) &= R[X(t)X(t+\tau)] \\ C(\tau) &= R[X(t)X(t+\tau_1)X(t+\tau_2)] \end{aligned}$$

식(4)를 식(14)에 대입하면 다음과 같이 된다.

$$\begin{aligned} \omega_1 + \omega_2 = 0 \\ R[dZ(\omega_1)dZ(\omega_2)] &= S(\omega_1)d\omega_1 \\ \omega_1 + \omega_2 \neq 0 \\ R[dZ(\omega_1)dZ(\omega_2)] &= 0 \end{aligned} \quad (15)$$

마찬가지로

$$\begin{aligned} \omega_1 + \omega_2 + \omega_3 &= 0 \\ E \left[dZ(\omega_1) dZ(\omega_2) dZ(\omega_3) \right] &= B(\omega_1, \omega_2) d\omega_1 d\omega_2 \\ \omega_1 + \omega_2 + \omega_3 &\neq 0 \\ E \left[dZ(\omega_1) dZ(\omega_2) dZ(\omega_3) \right] &= 0 \end{aligned} \quad (16)$$

으로 된다. 다시 말해서 스펙트럼은 주파수의 합이 0 인 두개의 푸리에 성분으로 부터 나온 평균 자승치의 기여도를 나타내고 Bispectrum은 주파수의 합이 0 이되는 세개의 푸리에 성분의 곱에서 나온 평균 세제곱의 기여도를 나타낸다.

정상과정 $X(t)$ 에 대한 위의 정의로부터 다음의 중요한 관계가 성립한다.

$$R(\tau) = R(-\tau) \quad S(\omega) = S(-\omega) \quad (17)$$

Bispectrum에 대해서는 3차의 곱으로서 다음과 같은 경계가 생긴다.

$$\begin{aligned} C(\tau_1, \tau_2) &= C(\tau_2, \tau_1) \\ &= C(-\tau_2, \tau_1 - \tau_2) = C(\tau_1 - \tau_2, -\tau_2) \\ &= C(-\tau_1, \tau_2 - \tau_1) = C(\tau_2 - \tau_1, -\tau_1) \end{aligned} \quad (18)$$

위식을 $B(\omega_1, \omega_2)$ 의 형태로 고쳐쓰면

$$\begin{aligned} B(\omega_1, \omega_2) &= B(\omega_2, \omega_1) \\ &= B(-\omega_2, \omega_1 - \omega_2) = B(\omega_1 - \omega_2, -\omega_2) \\ &= B(-\omega_1, \omega_2 - \omega_1) = B(\omega_2 - \omega_1, -\omega_1) \end{aligned} \quad (19)$$

로 된다.

또 $B(\omega_1, \omega_2) = B^*(-\omega_1, -\omega_2)$ 가 성립한다. 식(18), (19)에서 주어진 기본적인 기하학적 특성을 아래 그림에 표시하였다. 이 그림은 이산화한 데이터에 대한 Bispectrum을 나타낸다. 특히 실시간 계열(Real-Time Series) $x(t)$ 에 대해서는 단지 그림에서 보이는 점채된 부분만 계산하면된다. 그림의 다른 부분들은 점채된 부분으로부터 계산되어질 수 있다.

이상의 식으로부터 Auto-Bispectrum, Cross-Bispectrum, Auto-Bicoherence, Cross-Bicoherence를 다음과 같이 정의 한다.

Auto-Bispectrum (ABS)

$$\begin{aligned} ABS(\omega_1, \omega_2) &= B_{XXX}(\omega_1, \omega_2) \\ &= \frac{1}{(2\pi)^2} \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} C(\tau_1, \tau_2) \exp(-j(\omega_1 \tau_1 + \omega_2 \tau_2)) d\tau_1 d\tau_2 \\ \text{Where } C(\tau) &= E[X(t)X(t+\tau_1)X(t+\tau_2)] \end{aligned}$$

Cross-Bispectrum(CBS)

$$\begin{aligned} CBS(\omega_1, \omega_2) &= B_{XXY}(\omega_1, \omega_2) \\ &= \frac{1}{(2\pi)^2} \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} C(\tau_1, \tau_2) \exp(-j(\omega_1 \tau_1 + \omega_2 \tau_2)) d\tau_1 d\tau_2 \\ \text{Where } C(\tau) &= E[X(t)X(t+\tau_1)Y(t+\tau_2)] \end{aligned}$$

Auto-Bicoherence(ABC)

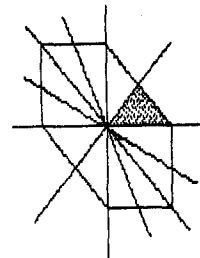
$$ABC(\omega_1, \omega_2) = \frac{B_{XXX}(\omega_1, \omega_2)}{\sqrt{X(\omega_1) X(\omega_2) X(\omega_1 + \omega_2)}}$$

Cross-Bicoherence(CBC)

$$CBC(\omega_1, \omega_2) = \frac{B_{XXY}(\omega_1, \omega_2)}{\sqrt{X(\omega_1) X(\omega_2) Y(\omega_1 + \omega_2)}}$$

Bispectrum의 계산은 주파수영역에 있어서의 세개의 푸리에 성분중에 한개를 공액으로 하여 계산하며, 신뢰성을 높이기 위하여 되도록 많은 Time Averaging을 행하였다.

본 논문은 식(14)부터 식(19)까지의 계산과정을 통하여 각주파수 성분간의 위상관계, 진폭관계, 상호간섭정도 등을 회전기기가 갖는 주파수특성에 대하여 Bispectrum 해석법을 적용하고, 그 물리적 의미를 고찰한다.



Symmetric relationship of the bispectrum

3. 컴퓨터 시뮬레이션

Bispectrum의 물리적인 의미를 알고자 회전기기의 특성을 갖는 시간영역의 파형을 만들어 고찰한다. 각 데이터는 기본적으로 5개의 주파수 f_1, \dots, f_5 를 가지며 샘플링타임은 0.015625초이다. 레코드 수는 64개이고 각 레코드는 128개의 시계열 데이터를 갖는다. Noise 성분은 난수발생 함수를 사용했으며, 수식은 다음과 같다.

$$X(t) = \exp(-j\xi\omega_n t) \sin(\omega_d t + \theta)$$

$$\text{Where } \omega_d = \omega_n \sqrt{1 - \xi^2}$$

경우 1) 입력과 출력사이의 Noise 성분의 변화가 Bispectrum에 미치는 영향

입력주파수가 $f_1=4, f_2=8, f_3=12, f_4=16, f_5=20$ 이고 Noise 성분이 전혀없는 경우의 ABS 와 ABC 를 그림 1 (a)에 표시한다. 출력주파수가 $f_1=4, f_2=8, f_3=12, f_4=16, f_5=20$ 이고 Noise 성분이 0.2 인 경우의 ABS 와 ABC 를 그림 1 (b)에 표시한다. 그림 1 (c)는 입출력사이의 CBS 와 CBC 이다. 그림 1 (a)에서 Noise 성분이 없는 경우의 ABC 는 전 구간에서 1의 값을 갖는다. Noise 를 갖는 경우의 ABC 는 그림 1 (b) 에서 나타나듯이 ABS 의 피크부근에서 높은 값을 가짐을 알 수있다. 그림 1 (c)는 전 구간에서 피크치를 갖는데, 이런 현상은 입력과 출력중 어느 한가지라도 Noise 성분이 전혀 없을 때를 나타낸다. 그림 1의 ABS 와 CBS 가 같은 형태를 갖는 것으로 보아서 ABS 와 CBS는 Noise 의 영향을 받지 않음을 알 수 있다. 그림 2 는 그림 1의 입력에 0.2 Noise 성분을 더한 것이다. 이경우 CBC 의 값이 입력의 ABS 의 피크 부근에서 CBC 도 높음을 알 수있다. ABC 의 경우 Noise 성분이 증가함에 따라 ABC 의 값이 낮아짐을 알 수 있다. Noise 성분이 0.2, 0.4, 0.6, 0.8, 1.0 으로 변할 때 ($f_1=4, f_2=16, f_3=20$) 인 주파수 성분에 대한 ABC 를 그림 3에 표시한다. 같은 경우로 입력에 0.2 Noise이고 출력에 0.2, 0.4, 0.6, 0.8, 1.0 의 비로 Noise 성분을 증가 시켜서 주파수 성분($f_1=4, f_2=16, f_3=20$) 에 대한 CBC 의 변화를 그림 4에 표시한다. 이 경우에 CBC 의 값의 변화는 출력의 Noise 성분변화에 관계없고 어떤 일정 수준을 유지 함을 알 수 있다.

경우 2. side band 가 bispectrum 해석에 미치는 영향.

입력은 그림 2의 (a) 를 사용하고 출력은 각 경우마다 기준 주파수 f_1, f_2, f_3, f_4, f_5 에 각각 - 0.5Hz의 Side Band 을 준 것으로 사용하였다. 다섯 경우중 첫번째 경우에 대하여 출력의 ABS 를 그림 5-1 (a)에, 입출력 사이의 CBS CBC 를 그림 5-2 (b) 에 표시하였다.

마찬가지로 두번째 경우는 그림 5-2의

(a) (b) 에 나타난다. 그림 5-1(a) 에서 ABS 는 Side Band 가 발생한 4Hz를 중심으로 ABS 가 크게 나타났다. 그러나 $f_1=8$ Hz인 경우에 ($f_2=8, f_2=12$) 인 경우가 나타나지 않는 것은 아니고 상대적으로 작아서 잘 보이지 않을 뿐으로, 그림 1 (a)정도의 피크는 발생한 것이다. 그림 5-2 (b)를 보면 Side Band 가 발생한 주파수 8Hz를 기준으로 ($f_1=4, f_2=8$), ($f_1=4, f_2=8$), ($f_1=8, f_2=8$), ($f_1=8, f_2=12$) 인 경우에 큰 피크를 가져서 Side Band 가 발생한 주파수를 중심으로 f_1, f_2, f_3 가 모두 존재하는 경우에 피크를 갖는다. 그러나 ABC 는 주파수 성분별로 모든곳에서 피크값을 가짐을 알 수 있다. 그림 5-2(b) 의 CBC 는 $f_1=4, f_2=4$ 인 경우에만 피크 값을 갖는데 이는 Side Band 에 발생한 주파수가 f_3 에 해당되는 경우이다. 이는 f_1 과 f_2 의 합이 Side Band 발생 주파수로 나타난 것이다. CBC 는 CBS 에서 발생한 피크에서 날카로운 형태를 가짐을 볼 수 있다. 그림 5-3 (a)는 Side Band 가 발생한 주파수가 12Hz 이고 이를 기준으로 12Hz가 f_1, f_2, f_3 중에 어느 한가지이고 나머지 주파수가 존재하는 데서 피크를 갖는다. 즉, ($f_1=4, f_2=8, f_3=12$), ($f_1=4, f_2=12, f_3=16$), ($f_1=8, f_2=12, f_3=20$) 인 경우이다. 그림 5-3(b) 의 CBS 도 그림 5-2(b) 와 마찬가지로 f_3 가 Side Band 를 갖는 주파수로 나타나고 나머지 f_1, f_2 가 존재하는 주파수로 ($f_1=4, f_2=4$)인 경우 밖에 없다. $f_1=8$ 이고 $f_2=4$ 인 경우도 발생할 수 있지만 계산상에 계산이 되지 않은것 뿐이다. 같은 식으로 그림 5-4 (a)는 16Hz를 기준으로 ($f_1=4, f_2=12, f_3=16$), ($f_1=4, f_2=16, f_3=20$), ($f_1=8, f_2=8, f_3=16$) 인 경우에만 발생하였다. 같은 방식으로 그림 5-5도 해석이 된다. 그림 5-1(b) 의 CBS 가 전 구간에서 낮은 피크만을 갖는 것은 $f_3=4$ 일때 이를 구성할 수 있는 f_1 과 f_2 가 없기 때문으로 해석 할 수 있다. 이상을 정리해보면 Side Band 는 ABS 에서는 Side Band 가 발생할 주파수가 f_1, f_2, f_3 중에 어느 것이 라도 되고 나머지 주파수가 존재한다면 피크로 나타나고 ABC 에서는 Side Band 가 발생한 주파수가 넓어지는 경향이다. CBS 는 f_3 가 Side Band 발생 주파수가 되고 이에 따라 f_1 과 f_2 가 존재한다면 피크값을 갖는다. 그러나 전체적으로 보아서 ABC 의 피크가 CBC 의 피크에 영향을 주지 않음을 알 수 있다. 주의 할 점은 각 모드에서 그림 1 에 경우에서 발생한 피크가 없는

것이 아니라 상대적으로 작아 보이는 것 뿐이라는 것이다.

경우 3. 주파수 변동이 Bispectrum에 미치는 영향

출력 주파수 f_1 이 4Hz에서 315Hz로 변한 경우를 그림 6-1에 나타내었다. 그림 6-1(a)는 출력의 ABS 과 ABC 이다. 이 경우에 변조된 주파수 4 Hz을 중심으로 ($f_1=4, f_2=8, f_3=12$), ($f_1=4, f_2=12, f_3=16$), ($f_1=4, f_2=16, f_3=20$)에 대하여 피크값을 가짐을 알 수 있다. 또 다른 주파수 성분의 값도 나타났으나 상대적으로 작은 값이어서 잘 보이지 않지만 ABC 를 보면 다른 주파수 성분의 기여가 있음을 알 수 있다.

같은 방법으로 출력 주파수를 $f_1=4, f_2=8, f_3=12, f_4=10, f_5=20$ 인 경우를 그림 6-2에 나타내었다. 이 경우에 ($f_1=4, f_2=12, f_3=20$), ($f_1=8, f_2=12, f_3=20$)에 대하여 피크값을 가짐을 알 수 있다. ABC 값도 피크값에서 큰 값을 가지며 앞 경우와 마찬가지로 다른 주파수 성분에 의한 기여가 있음을 알 수 있다. 그림 6-2 (b)의 CBS 는 전 구간에서 낮은 값으로 분포하게 되며 변조된 주파수 12.5 Hz가 f_3 에 해당되고 ($f_1=4, f_2=8$)인 경우에 상대적으로 낮으며 여러개의 피크값을 갖는 것으로 보아서, 입력을 출력에 대한 상관값으로 해석해 볼 때 주파수 12Hz가 변조했음을 추측할 수 있다. CBC 에서도 이 주파수에서 넓은 분포의 값을 가지고있다. 마찬가지로 출력 주파수가 $f_1=4, f_2=8, f_3=12, f_4=15.5, f_5=20$ 인 경우를 그림 6-3에 표시한다. 그림 6-3 (a)는 출력의 ABS 으로서 ($f_1=4, f_2=16, f_3=20$)인 경우에 피크값을 가지며 앞의 경우와 마찬가지로 변조된 주파수가 f_2 가 해당되는 부분에서 피크가 된다. ABC 에서도 피크에서 큰 값을 가짐을 알 수 있다.

그림 6-3(b)의 CBS 는 높은 피크 값은 없지만 변조된 주파수 f_3 가 16Hz 인 경우로 ($f_1=4, f_2=8$), ($f_1=8, f_2=8$)인 경우에 여러개의 피크값을 가짐을 알 수 있다. 이상을 조합해 보면 변조된 주파수는 ABS 에서 높은 피크부근에서 높은 값을 갖는다. CBS 는 f_3 가 변조된 피크로 보았을때 f_1, f_2 가

만들 수 있는 조합부근에서 여러개의 낮은 피크를 갖게 되고 CBC 에서 넓은 분포의 값을 갖게 된다.

4. 결과 및 고찰

컴퓨터 시뮬레이션에 대한 Bispectrum 해석법을 회전기기에 적용하기 위해 얻어진 결과를 정리하면 다음과 같다.

- 1) Noise 변화에 따라 ABS 과 CBS 은 영향을 받지 않는다. 그러나 ABC 의 경우에 Noise 성분이 커짐에 따라 피크의 값이 비례적으로 작아짐을 알 수 있다. CBC 는 입력과 출력 모두에 Noise 성분이 있어야 기여된 주파수 성분에 피크를 갖고 입출력중 어느 한 곳이 상대적으로 Noise 비가 높아도 CBC 자체에는 변조 영향을 주지 않음을 알 수 있다.
- 2) Side Band 가 발생한 경우 그 주파수 성분을 기준으로 f_1, f_2 중 어느 한 가지가 되고 나머지 f_3 가 있는 경우에서 ABS 의 값은 상대적으로 높은 피크를 가지며 ABC 도 같은 경향을 가진다. CBS 는 Side Band 주파수가 f_3 에 해당되고 이를 만족할 수 있는 f_1, f_2 가 있는 부근에서 피크를 가진다. CBS 의 피크에서 가장 높으며 날카로운 형상을 갖는다.
- 3) 주파수 변동은 ABC 에서는 f_2 또는 f_1 에 해당되고 f_3 가 있는 곳에서 상대적으로 높은 피크를 갖고 ABC 도 같은 경향이다. CBS 는 f_3 가 변조된 주파수에 해당되며 전체적으로 낮은 피크가 f_3 을 만족하는 f_1, f_2 의 경우에서 여러개의 피크를 갖는다. CBC 는 ABS 과 같은 경향이고 CBC 는 변조된 주파수가 f_3 로 하는 f_1, f_2 에서 넓은 범위의 값을 갖게 된다.
- 4) 앞으로의 본 연구는 실제의 회전기기에 적용하여 그 타당성을 검토하고자 한다.

이상의 결과로서 파워스펙트럼에서는 알

수 없는 인접해 있는 저주파 성분의 Noise 변화나 Side Band 발생 또는 주파수 변화에 대하여 바이트펙트럼이 민감한 변화를 가지며 각 경우에 대하여 각기 다른 경향의 ABS, ABC, CBS, CBC를 가지기 때문에 회전기기를 이상 진단하는 방법으로 유용한 방법이 되리라고 생각한다.

참 고 문 헌

(1) 오재응, " Bispectrum 해석에 의한 기기 이상진단의 응용에 관한 연구", 한양대학교산업과학연구소 논문집, 제18집, pp .117-123,1984

(2) P.J Huber, B.Kleiner, T.Gasser, and G.-Dumermuth, "Statistical method for investigating phase relation in stationary stochastic process", IEEE Trans. Audio Electroacoust., pp.78-86,Mar.1971

(3) T.Matsuoka and T.J.Ulry, "Phase estimation using the bispectrum," Proc.IEEE, pp,1403-1411,Oct.1984.

(4) Takuso Sato, "Bispectral holography:", J. Acoust. Soc. Am, Vol.62, No.2, August 1977.

(5) Mysore R. Raghuvver and Chrysostomas L. Nikias, "Bispectrum Estimation: A Parametric Approach", IEEE Trans. SPEECH, and SIGNAL PROCESSING, Vol.ASSP-33, No .4, OCT. 1985

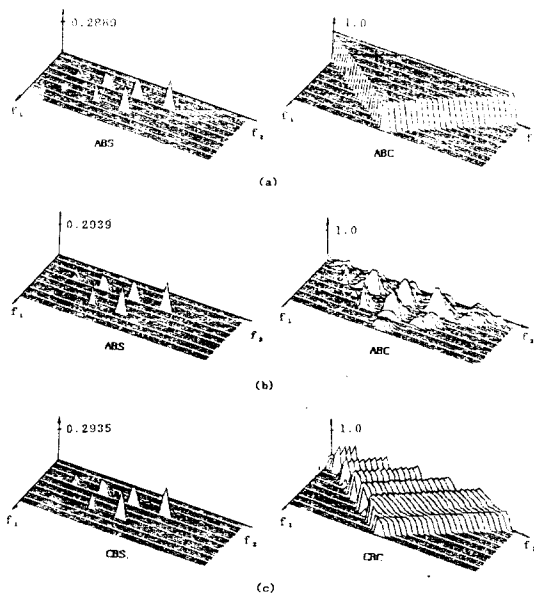


그림 1 Noise 변화에 따른 Bispectrum

(a) 주파수(f_1, f_2, f_3, f_4, f_5) + Noise(0.0)
 (b) 주파수(f_1, f_2, f_3, f_4, f_5) + Noise(0.2)

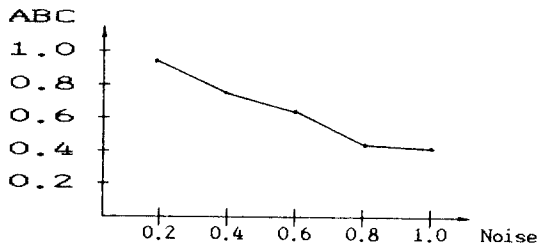


그림 3 Noise 변화에 따른 ABC 의 변화.

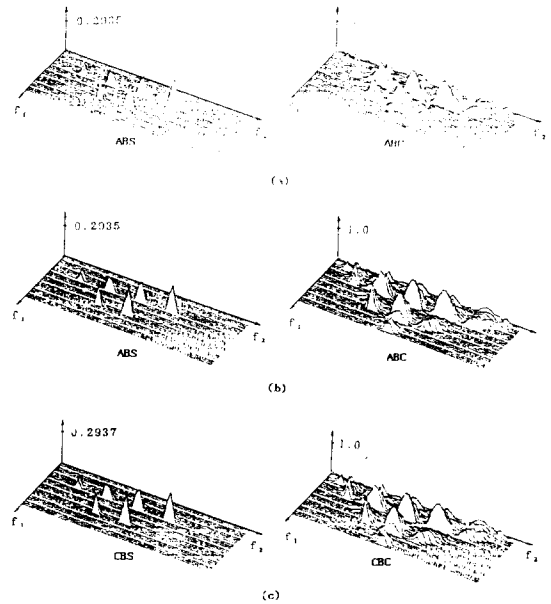


그림 2 Noise 변화에 따른 Bispectrum

(a) 주파수(f_1, f_2, f_3, f_4, f_5) + Noise(0.0)
 (b) 주파수(f_1, f_2, f_3, f_4, f_5) + Noise(0.2)

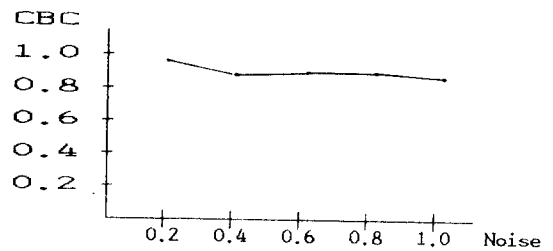


그림 4 Noise 변화에 따른 CBC 의 변화.

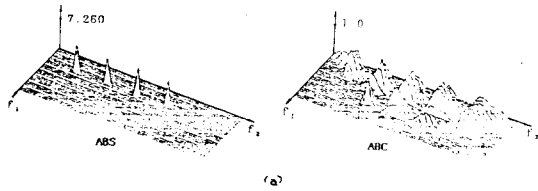


그림 5-1 Side Band 변화에 따른 Bispectrum

○ Side Band 가 발생한 주파수 (4kHz)

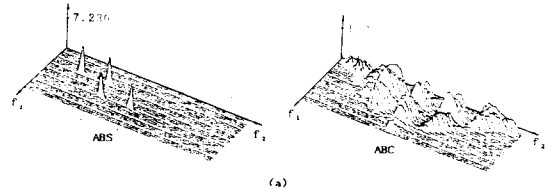


그림 5-2 Side Band 변화에 따른 Bispectrum

○ Side Band 가 발생한 주파수 (8kHz)

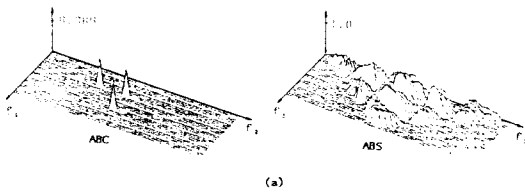


그림 5-3 Side Band 변화에 따른 Bispectrum

○ Side Band 가 발생한 주파수 (12kHz)

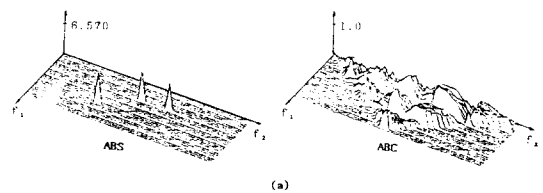


그림 5-4 Side Band 변화에 따른 Bispectrum

○ Side Band 가 발생한 주파수 (16kHz)

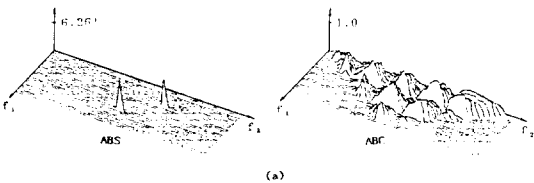


그림 5-5 Side Band 변화에 따른 Bispectrum

○ Side Band 가 발생한 주파수 (20kHz)

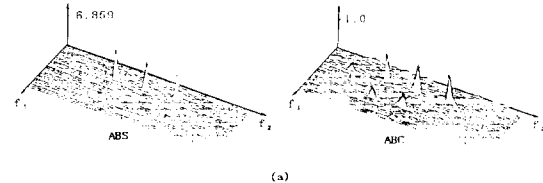


그림 6-1 주파수 변화에 따른 Bispectrum

출력 $f_1(4kHz) \rightarrow f_1(3.5kHz)$

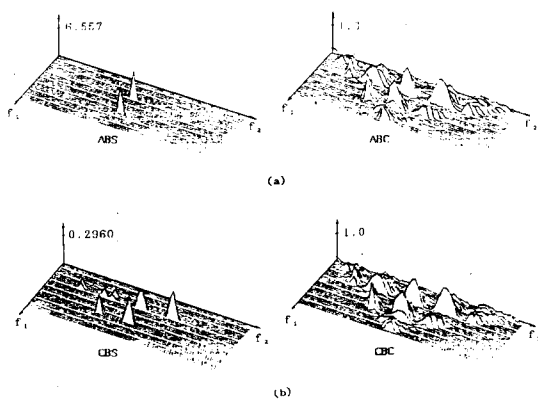


그림 6-2 주파수 변화에 따른 Bispectrum
 음역 $f_3(12Hz) \rightarrow f_3(12.5Hz)$

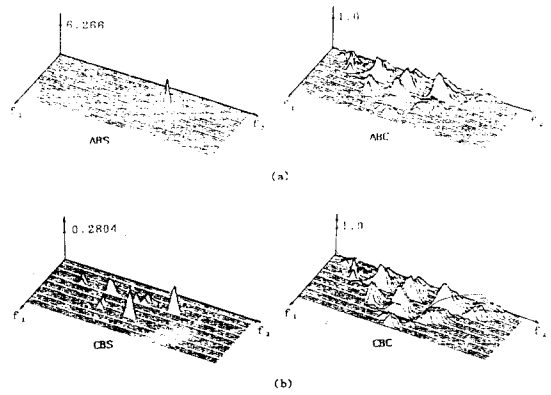


그림 6-3 주파수 변화에 따른 Bispectrum
 음역 $f_4(16Hz) \rightarrow f_4(15.5Hz)$