

저주파진동 해석을 위한 데이터처리기법 연구

Power Spectrum Estimation on the Signals with Low Frequency.

천 영 수*
Chun, Young-Soo

조 남 규**
Cho, Nahm-Gyoo

이 리 형***
Lee, Li-Hyung

요 지

대형 건축물의 진동과 같은 초저주파 진동특성의 해석을 수행하기 위해서는 측정대상 및 측정조건, 그리고 목적으로 하는 측정요소에 적합한 측정시스템이 구축되어야 하며, 구축된 측정시스템으로부터 얻어진 극히 제한된 유한량의 데이터로부터 목적하는 특성요소를 추출하기 위한 정밀한 데이터분석기술이 요구된다. 따라서, 본 연구에서는 고신뢰성의 저주파진동 특성의 분석을 위한 효과적인 데이터처리기법의 개발을 목표로, 측정조건에 따른 저주파진동 해석의 문제점을 분석하고, FFT법과 MEM법의 저주파응답 특성을 비교하였으며, 비교결과를 토대로 저주파진동 해석에 적합한 알고리즘을 결정하였다. 또한, 결정된 분석 알고리즘의 성능을 명확히 하여 정밀분석을 위한 측정데이터의 최적조건을 제시하였다

Abstract

A major problem of frequency analysis in the field of low-frequencies such as building or construction vibration is the way of signal processing which is appropriate to obtain included frequency content from the finite process to be measured. Therefore, it is the aim of the investigation reported herein to develop the signal processing algorithm which is analyzed without losing the reliability of the measurements in low-frequency domain. To accomplish the research objective, it was analyzed the problems on the way of signal processing in low-frequency domain, and compared the response characteristics of FFT with those of MEM (Maximum Entropy Method) about the low-frequency of vibration. This evaluation of the response characteristics is used in determining appropriate signal processing algorithm into the low-frequency domain.

Keywords : power spectrum, maximum entropy method, low-frequency

1. 서 론

대형 건축물의 진동과 같은 초저주파 진동특성

의 해석을 수행하기 위해서는 측정대상 및 측정조건, 그리고 목적으로 하는 측정요소에 적합한 측정시스템이 구축되어야 하며, 구축된 측정시스

* 정회원·대한주택공사 연구원, 한양대학교 박사과정
** 한양대학교 기계공학과, 교수
*** 정회원·한양대학교 건축공학과, 교수

·이 논문에 대한 토론을 1998년 3월 31일까지 본 학회에 보내주시면 1998년 6월호에 그 결과를 게재하겠습니다.

템으로부터 얻어진 극히 제한된 유한량의 데이터로부터 목적하는 특성요소를 추출하기 위한 정밀한 데이터분석기술이 요구된다. 진동의 특성을 파악하기 위한 스펙트럼분석법은 각종 구조물 및 지반의 특성을 비롯한 건축, 토목분야, 그리고 해양, 기계 및 전자분야 등을 필두로 하여 다양한 분야에 걸쳐 시계열로 구하여지는 측정데이터의 분석 및 평가에 널리 사용되고 있는 데이터처리기법이다. 주파수영역에서 파워스펙트럼을 얻기 위한 방법으로는 직접적인 푸리에(Fourier) 변환에 의한 방법과 Wiener-Khinchine의 관계식에 의하여 일단 자기상관함수를 구하고, 그로부터 푸리에변환을 수행하는 두가지 방법이 제안되어 사용되어 왔으나, 1965년 Cooley와 Tukey가 유한 푸리에변환을 효과적으로 수행하는 FFT¹⁾ 알고리즘을 발표한 이래, 이 방법이 압도적으로 이용되고 있다. 한편, 이들 방법과는 달리, Maximum Entropy Method(MEM)라는 전혀 다른 원리에 의하여 스펙트럼을 얻을 수 있는 방식이 1967년 Burg에 의하여 제안되었으며²⁾, 1969년에는 Akaike가 자기회귀식에 의한 방법을 발표하였다^{3,4)}. MEM은 분해능과 짧은 데이터에 있어서의 우수성을 보이고 있어, 변화주기가 극도로 완만한 자연현상이나 대형건축물 등과 같이 관심 대상의 주파수성분이 저주파영역인 경우, 그리고 인접한 주파수성분이 혼재되어 있는 경우에 특히 그 우수성을 인정받고 있다. 다만, 실제의 대상에 적절히 적용시키기 위해서는 위상에 따른 파워의 저감현상, 연산처리속도 등의 문제가 아직 해결되지 않아 보다 활발한 연구가 요구되고 있는 실정이다. 따라서, 본 연구에서는 일반적으로 적용되고 있는 FFT법과 MEM법에 대하여 저주파응답특성을 비교함으로써 저주파 신호분석에 있어서 MEM방법의 우수성을 검증하고, 적용된 알고리즘의 성능 및 특성을 명확히하여 저주파영역에서의 진동특성 검출을 효과적으로 수행하기 위한 최적의 측정조건을 제시하고자 한다. 특히, 본 연구에서는 최근 주택공사에서 아파트건물의 고유주기를 평가하기 위하여 실제 건물을 대상으로 실시된 바 있는 상시미진동(Ambient Vibra-

tion) 현장측정⁵⁾ 결과에 준하여 이러한 불규칙진동(Random Vibration) 데이터의 분석시 요구되는 측정조건을 정량적으로 제시하고자 한다.

2. Maximum Entropy Method(MEM)

MEM알고리즘과 FFT알고리즘의 기본적인 차이점은 측정영역 이외 부분의 영역에 대한 처리 방식에 따라서 크게 달라진다. 푸리에(Fourier) 알고리즘에 의한 해석방식에서는 측정영역 이외 부분을 영(zero)으로 놓거나 측정영역의 데이터 성분이 무한 반복하는 함수로 생각하고 데이터의 변환이 이루어지나, MEM 알고리즘에 의한 분석법에서는 측정데이터로부터 얻어진 정보만을 중시하여 처리가 수행되어진다. 즉, 종래의 방법은 주어진 데이터를 원 데이터의 일부로 간주하여 처리하는데 반하여, MEM법에서는 데이터를 주어진 것으로만 생각하고 정보엔트로피⁶⁾의 개념을 도입하여 미지의 데이터부분에 대한 불확실성에 대처하여 데이터처리를 수행한다.

2.1 정보 엔트로피

엔트로피의 개념은 본래 열역학 및 통계물리학 분야에서 정의된 개념으로 무질서한 정도나 불규칙한 정도를 나타내던 것으로 정보이론에서는 미지의 정도 즉, 불확실성의 정도를 표현하기 위하여 도입되었다. 어떤 사상 A가 일어날 확률을 p, 일어나지 않을 확률을 q=1-p라고 할 때, 사상 A가 일어날 때의 정보량 I_A는

$$I_A = \log_2 \frac{1}{p} \quad (2.1)$$

로 정의될 수 있다. I_A는 사상 A가 일어날 확률이 1.0일 때 0이며, 확률이 0에 접근함에 따라 무한대에 접근하게 되는 양이 된다. 정보엔트로피(H)는 1회의 시행에 의하여 얻어질 수 있는 정보량의 기대값으로 정의된다.

$$H = E[I_A] = \sum P_i \log \frac{1}{p_i}$$

연속확률사상의 경우 다음과 같이 쓸 수 있다.

$$H = - \int P(x) \log P(x) dx \quad (2.3)$$

2.2 Toplitz행렬

어떤, 이산시계열 $x(0), x(\Delta t), x(2\Delta t), \dots, x(m\Delta t)$ 에 대하여 각 시각에 있어 x 가 취할 수 있는 값 x_k 가 $x(k\Delta t) = x_k, k=0, 1, 2, 3, \dots, m$ 인 연속량이며, $x_0, x_1, x_2, \dots, x_m$ 의 동시확률분포를 $P(x_0, x_1, x_2, \dots, x_m)$ 로 정의하면, 엔트로피는

$$H = - \int P(x_0, x_1, \dots, x_m) \log P(x_0, x_1, \dots, x_m) dv \quad (2.5)$$

로 쓸 수 있으며, 주어진 사상이 가우스분포 (Gaussian Distribution)를 따를 경우,

$$H = \frac{1}{2} \log [Det C_m] \quad (2.6)$$

이 된다. 식 (2.6)에서 C_m 은 x_k 의 상관함수로 구성되어지는 Toplitz 행렬로

$$C_m = \begin{pmatrix} C(0) & C(-1) & C(-2) & \dots & C(-m) \\ C(1) & C(0) & C(-1) & \dots & C(-m+1) \\ C(2) & C(1) & C(0) & \dots & C(-m+2) \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ C(m) & C(m-1) & C(m-2) & \dots & C(0) \end{pmatrix} \quad (2.7)$$

$$C(k) = E[x(i) \times x(i-k)] \quad (2.8)$$

이다. $C(k)$ 는 래그(lag)가 k 인 자기상관함수 (Auto-correlation Function)이다.

2.3 상관함수와 엔트로피

스펙트럼과 자기상관함수와의 관계는 식 (2.9)

및 식 (2.10)과 같이 Wiener-Khintchine의 관계식으로 주어지며, 여기서 $f_n = (1/2\Delta t)$ 은 Nyquist 주파수를 나타낸다

$$\int_{-f_n}^{f_n} P(f) e^{i2\pi k\Delta t} df = c(k) \quad (2.9)$$

$$p(f) = \Delta t \sum_{k=-\infty}^{\infty} C(k) e^{i2\pi f\Delta t} \quad (2.10)$$

같은 방법으로 Toplitz행렬과 스펙트럼과의 관계를 구하면 식 (2.11)과 같다.

$$\lim_{m \rightarrow \infty} (Det C_m)^{\frac{1}{m+1}} = 2f_n \exp \left[\frac{1}{2f_n} \int_{-f_n}^{f_n} \log P(f) df \right] \quad (2.11)$$

식 (2.11)에서 m 이 ∞ 가 될 경우, 엔트로피는 발산하게 되므로 발산하지 않도록 엔트로피 밀도를 다음과 같이 정의한다.

$$h = \lim_{m \rightarrow \infty} \frac{H}{m+1} = \lim_{m \rightarrow \infty} \log [Det C_m]^{\frac{1}{m+1}} = \frac{1}{2} \log 2f_n + \frac{1}{4f_n} \int_{-f_n}^{f_n} \log P(f) df \quad (2.12)$$

2.4 최대 엔트로피 스펙트럼

상기의 Wiener-Khintchine의 관계식으로부터 알 수 있듯이 유한한 길이의 데이터를 사용하는 경우 래그가 커질 경우에는 측정된 데이터 이외의 부분을 필요로 하게 된다. 이에 대하여 Burg²⁾는 "스펙트럼의 푸리에변환이 자기상관함수라고 하는 Wiener-Khintchine의 관계식하에서 정보 엔트로피가 증가하지 않도록 미지부분의 자기상관함수를 추정하는 것이 가장 타당하다"고 제안하였다. 따라서, 최대엔트로피는

$$\frac{\partial h}{\partial C(k)} = 0 \quad (k \geq m+1) \quad (2.13)$$

과 같이 나타낼 수 있으며, 식 (2.13)으로부터 $C(k+1)$ 는

$$\text{Det} \begin{bmatrix} C(1) & C(0) & C(-1) & \cdots & C(m-1) \\ C(2) & C(1) & C(0) & \cdots & C(m-1) \\ C(3) & C(2) & C(1) & \cdots & C(m-3) \\ \dots & & & & \\ \dots & & & & \\ C(m+1) & C(m) & C(m-1) & \cdots & C(1) \end{bmatrix} = 0 \quad (2.14)$$

와 같이 되고, 식(2.14)와 스펙트럼 $P(f)$ 의 관계는

$$\int_{-f_n}^{f_n} \frac{e^{i2\pi kf\Delta t}}{P(f)} df = 0 \quad (k \geq m+1) \quad (2.15)$$

와 같이 된다. 식(2.15)로부터 $1/P(f)$ 은 $2m+1$ 개의 유한한 급수로 전개되는 것을 알 수 있으며, 이는 다음과 같이 표시할 수 있다.

$$\frac{1}{P(f)} = \sum_{k=-m}^m b_k e^{i2\pi kf\Delta t} \quad (2.16)$$

윗 식에서 $(m+1)$ 개의 계수 $(\gamma_0 + \gamma_1 + \gamma_2 + \cdots + \gamma_m)$, 단 $\gamma_0=0$ 를 사용하면

$$\frac{1}{P(f)} = (\Delta t P_m)^{-1} * \left(\sum_{k=0}^m \gamma_k e^{i2\pi kf\Delta t} \right) * \left(\sum_{k=0}^m \gamma_k^* e^{i2\pi kf\Delta t} \right) \quad (2.17)$$

이 되며, $e^{i2\pi kf\Delta t} = z$ 로 놓으면

$$\frac{P_m}{\sum_{k=0}^m \gamma_k^* z^{-k}} = \sum_{k=-\infty}^{\infty} C(k) z^{-k} \sum_{k=0}^m \gamma_k z^{-k} \quad (2.18)$$

로 되어, z 의 등차수항을 비교하면 다음의 $(m+2)$ 개의 Yule-Walker 방정식을 얻는다.

$$z^0 : C(0) + \gamma_1 C(1) + \gamma_2 C(2) + \cdots + \gamma_m C(m) = P_m$$

$$\begin{aligned}
 z^1 : C(1) + \gamma_1 C(0) + \gamma_2 C(1) + \cdots + \gamma_m C(m-1) &= 0 \\
 z^2 : C(2) + \gamma_1 C(1) + \gamma_2 C(0) + \cdots + \gamma_m C(m-2) &= 0 \\
 z^m : C(m) + \gamma_1 C(m-1) + \gamma_2 C(m-2) + \cdots & \\
 &+ \gamma_m C(0) = 0 \\
 z^{m+1} : C(m+1) + \gamma_1 C(m) + \gamma_2 C(m-1) + \cdots & \\
 &+ \gamma_m C(1) = 0
 \end{aligned}$$

따라서, MEM법에 의한 스펙트럼의 추정은 식(2.17)로 주어지는 연립방정식의 미지수 항, γ_k P_m 를 구함으로써 이루어지게 된다. 즉, 상기의 방정식으로부터 γ_k 를 구하여 식(2.19)로 주어지는 MEM스펙트럼을 구하게 된다.

$$P(f) = \frac{\Delta t P_m}{\left| \sum_{k=0}^m \gamma_k e^{i2\pi kf\Delta t} \right|^2} \quad (2.19)$$

본 연구에서는 식(2.17)로 주어지는 연립방정식을 풀기 위하여 Levinson 알고리즘을 적용하였으며, 스펙트럼의 성능을 결정하는 MEM의 차수 m 을 결정하기 위한 기준으로 Akaike와 Ulrych가 제안한 FPE(Final Prediction Error)를 적용하였다.

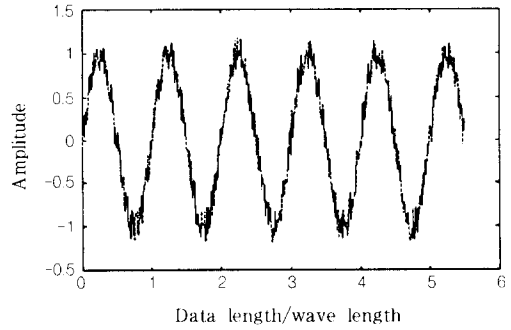
3. MEM과 FFT 의한 추정 스펙트럼 비교

스펙트럼의 추정에 대표적으로 사용되어 왔으며, 빠른 계산능력 등의 장점에 의하여 현재까지 가장 널리 사용되고 있는 FFT 알고리즘(Cooley-Tukey 알고리즘)과 MEM 알고리즘의 특성을 비교하기 위하여 저주파영역을 대상으로 다음과 같이 비교 실험하였다. 적용을 고려하는 스펙트럼 추정 알고리즘은 짧은 입력데이터로부터 입력 데이터에 포함되어 있는 저주기성분을 높은 분해능과 신뢰성을 가지고 분석할 수 있는 특징이 요구된다는 점에 착안하여 본 연구에서는 입력데이터의 길이 L 와 분석하고자 하는 주기성분의 파장 $\lambda(=2\pi f=2\pi/T)$ 의 비 L/λ 를 조건인자로 하여 비교하였다. 그림 3.1-그림 3.2는 입력주파수 1.0 Hz, L/λ 가 각각 1.25와 5.5로 주어졌을 때의 입력데이터 $x_n(t) = \sin(2\pi n\delta t + \phi)$, ($n: 0, 1, 2, \dots$)에 대한 두 스펙트럼의 추정결과를 보

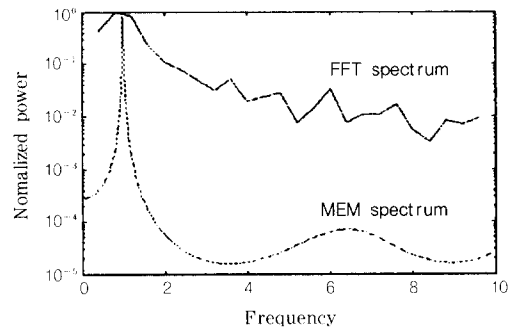
여주고 있다. 입력데이터에는 주주기성분의 20% ($S/N=5$)에 해당하는 랜덤노이즈(Random Noise)가 중첩되었다.

두 스펙트럼의 비교결과를 보면, L/λ 가 1.25로 주어진 그림 3. 1의 경우 FFT법에 의한 결과는 MEM법에 의한 결과에 비하여 주주기성분의 추정 주파수 및 분해능이 현저하게 뒤떨어지며, L/λ 가 5.5로 주어진 그림 3. 2의 경우에도 FFT법에 의한 결과는 주주기성분인 1.0 Hz 근방에서 비교적 양호한 추정결과를 보이고는 있으나 MEM법에 의한 결과보다 분해능면에서 상당히 뒤떨어지는 결과를 보이고 있음을 알 수 있다. 그러므로, 측정데이터의 길이가 짧을 경우 건축물의 진동과 같은 저주파진동의 분석에는 MEM법에 의한 분석이 월등히 유리할 것으로 판단된다.

하지만, MEM법에 있어도 문제점은 있다. 그림 3. 3-그림 3. 4는 그림 3. 1-그림 3. 2와 동



(a) 입력데이터



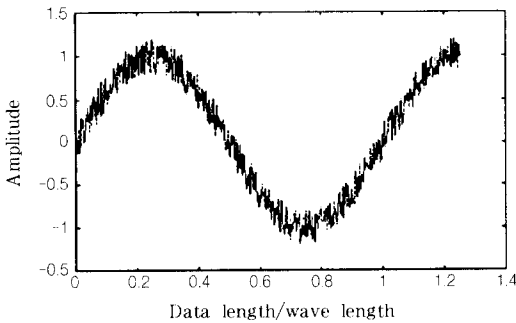
(b) 정규화 파워

그림 3. 2 $L/\lambda=5.5, S/N=5, N=512, \psi=0.0$

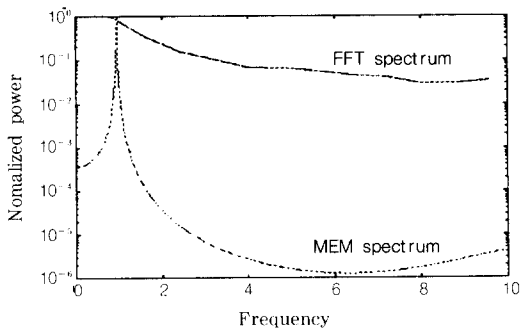
일한 조건하에서 S/N 를 1.0로 하였을 때의 결과로 증가된 노이즈의 영향으로 측정데이터의 길이가 매우 짧을 경우에는 MEM법에서도 상당한 분해능의 저감현상을 보이고 있음을 알 수 있다. 뿐만 아니라, 그림 3. 5-그림 3. 6은 MEM법에 있어서 위상차에 따른 스펙트럼의 변화를 나타낸 것으로 위상의 변화에 따라 최대 파워값이 각각 1.14와 4.48로 변화하며, 추정 최대주파수 역시 0.92 Hz와 0.9 Hz로 추정성능에 크게 영향을 받고 있음을 알 수 있다. 따라서, 본 연구에서는 스펙트럼의 추정오차를 명확히하여 분석시 이에 대한 적절한 대응책을 강구토록 함으로써 이러한 문제점을 해결하고자 하였다.

4. MEM법 적용을 위한 최적조건 결정

MEM법에 의한 스펙트럼의 추정은 주어진 표



(a) 입력데이터



(b) 정규화 파워

그림 3. 1 $L/\lambda=1.25, S/N=5, N=512, \psi=0.0$

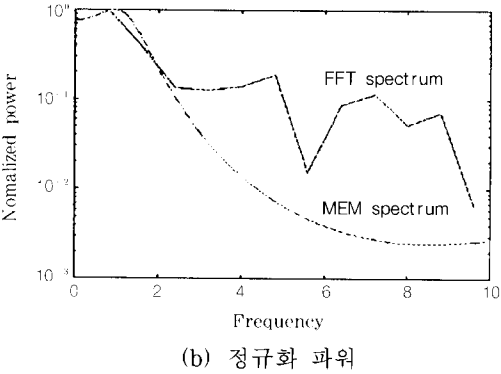
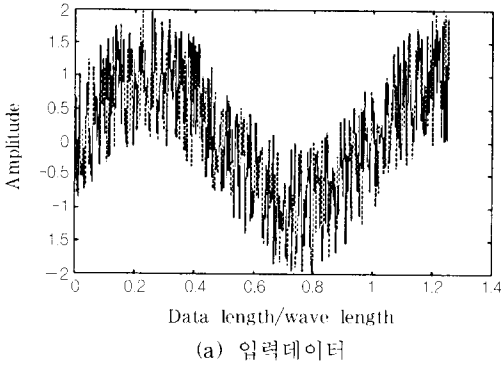


그림 3.3 $L/\lambda=1.25$, $S/N=1$, $N=512$, $\psi=0.0$

본간격 Δt 로 측정된 시계열 데이터에 대하여 P_m 과 λ_k 가 산출된 후, 식 (2. 19)로부터 추정된다. 이 때, P_m 과 λ_k 의 연산과정에는 일정한 샘플링 (Sampling) 간격으로 얻어진 시계열 데이터의 값과 데이터의 양(시계열 데이터의 수)만이 참조되며, 샘플링간격(Δt)과 같은 측정조건 인자들의 값은 전혀 참조되지 않는다. 그러므로, N 개의 이산값으로 이루어지는 측정 데이터열에 대하여 이산데이터의 샘플링간격 Δt 를 조건인자로 생각하면, 이산데이터열은 Δt 에 의존하면서 시간축에 대하여 상사성을 갖는 시계열 데이터로 생각할 수 있다. 또한, 이들 데이터열의 값이 일정하므로 데이터열이 갖는 주기성분에 대해서는 Δt 에 관계없이 동일한 L/λ 값을 갖게 된다. 따라서, Δt 의 변화에 대하여 식 (2. 19)의 결과를 추론함으로써, 다음과 같은 MEM법에 의한 추정 스펙트럼의 성질을 예측할 수 있다. 동일한 L/λ 값을

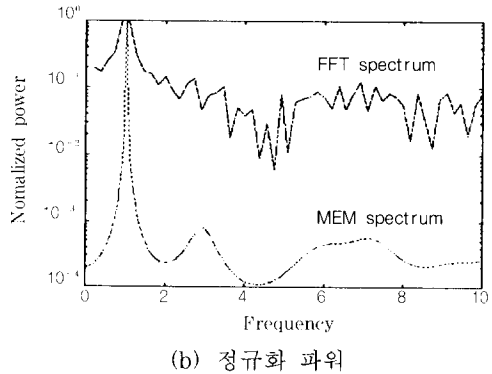
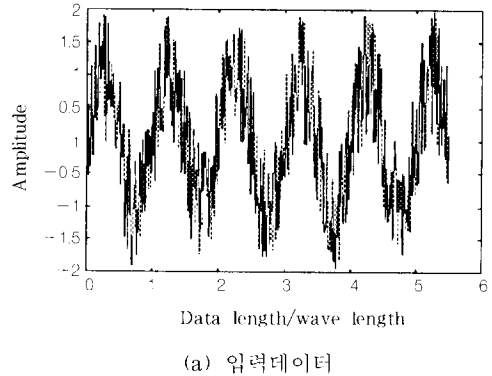
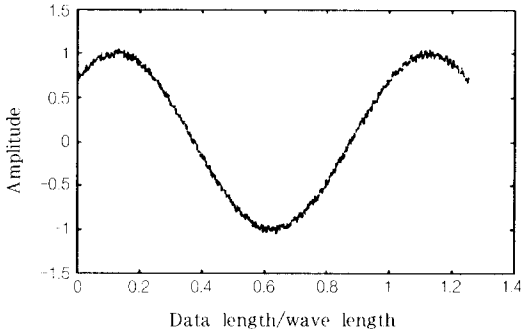
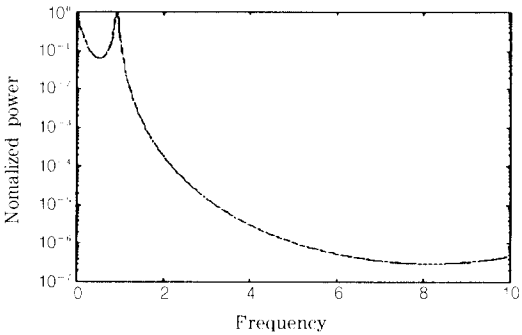


그림 3.4 $L/\lambda=5.5$, $S/N=1$, $N=512$, $\psi=0.0$

갖고 시간축에 대하여 상사성을 갖는 데이터열에 대하여, 간격 Δt 에 대한 추정주파수가 f_0 라고 하면, 간격 $n\Delta t$ 에 의한 추정주파수는 nf_0 로 주어진다. 즉, 관찰하고자 하는 주파수성분에 대한 주파수 추정오차 f_{error}/f_{true} 와 추정스펙트럼의 분해능 역시 상사성을 갖게 된다는 사실을 시사한다. 따라서, 본 연구에서는 이러한 사실로부터, 입력데이터의 길이 L 과 그에 대하여 분석하고자 하는 주기성분의 파장 $\lambda(=2\pi f=2\pi/T)$ 의 비 L/λ 를 조건인자로 하고, $x_n(t) = \sin(2\pi n\Delta t + \phi) + N(t)$, ($n: 0, 1, 2, \dots$)로 주어지는 시뮬레이션용의 데이터를 이용하여 저주기성분의 주파수 특성 분석을 위한 측정데이터의 조건을 검토하였다. 입력신호 중 $N(t)$ 는 정현파형의 데이터에 추가되는 랜덤노이즈로, 본 실험에서는 관찰하고자 하는 주파수성분에 비하여 타성분의 영향이 극히 심한 경우를 대상으로 100% ($S/N=0.1$)에



(a) 입력데이터

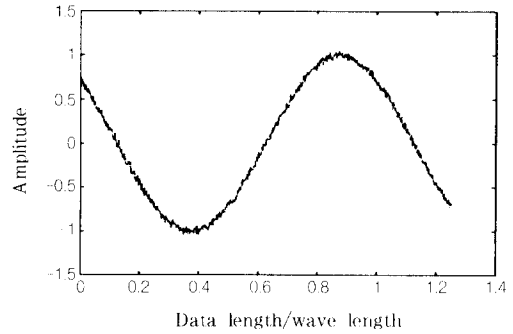


(b) 정규화 파워

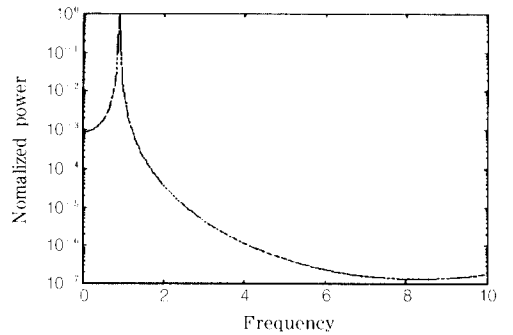
그림 3.5 $L/\lambda=1.25$, $S/N=20$, $N=512$, $\phi=0.025\pi$

해당하는 노이즈성분이 중첩되었다. 이러한 랜덤 노이즈성분의 작용은 시뮬레이션 실험이 수행될 때마다 추정결과에 불규칙한 영향을 미치게 될 것으로 판단된다. 또한, 식에서의 정현파성분의 위상으로 주어지는 ϕ 는 MEM법에 의한 저주파 성분의 주파수분석에 있어 추정오차의 원인으로 작용할 수 있는 주요 검토인자이다. 따라서, 본 실험에서는 이상과 같은 랜덤데이터의 추가에 의한 추정값의 변동과 함께 위상 ϕ 의 영향을 동시에 파악하기 위하여 위상값 역시 랜덤한 값으로 부여한 후에 충분한 횟수의 시뮬레이션 실험을 실시하고, 그로부터 통계적인 방법으로 안정된 결과를 추론하는 방법을 채택하였다.

그림 4. 1은 시뮬레이션에 의한 검토 결과를 나타낸 것으로, 데이터열의 크기는 2000개이다. 그림 4. 1(a)는 최대 스펙트럼을 보이는 주파수 값 f_p 에 대한 주파수 추정오차 e_{f_p} 의 비(f_p/e_{f_p})



(a) 입력데이터



(b) 정규화 파워

그림 3.6 $L/\lambda=1.25$, $S/N=20$, $N=512$, $\phi=0.75\pi$

를 나타낸 것으로, L/λ 의 값이 증가함에 따라 최대 스펙트럼값을 갖는 주파수값의 추정오차가 감소함을 알 수 있다. 이것은 앞에서 예측한 바와 같이 관찰하고자 하는 주파수 성분에 대한 정보가 측정되어진 데이터 길이에 의존하고 있음을 구체적으로 확인할 수 있다. 그림 4. 1(b)는 같은 데이터에 의한 결과로 최대 주파수 성분의 주파수를 판독하기 위한 분해능의 평가능력을 검토하기 위하여 최대 파워값으로부터 파워가 1/2로 감소할 때까지의 주파수 폭을 B_p 로 하여 (a)의 경우와 마찬가지로 최대 스펙트럼을 보이는 주파수 값 f_p 에 대한 비(B_p/f_p)를 나타낸 것으로, 분해능 역시 추정오차의 경우와 유사하게 L/λ 의 값이 증가함에 따라 감소함을 확인할 수 있다. 그림 4. 1(a)에 보이는 선은 다양한 신호조건에 대한 추정오차의 상한값으로 볼 수 있으며 다음과 같은 식으로 표현된다.

$$e_p/f_p = 0.4(L/\lambda)^{-1.13} \quad (4.1)$$

또한, 그림 4.1(b)의 실선은 밴드폭의 상한선을 나타내며, 다음의 식으로 표현된다.

$$B_p/f_p = 1.12(L/\lambda)^{-1.02} \quad (4.2)$$

이들의 결과로부터, 측정데이터 길이가 10~100초일 때, 관찰하고자 하는 대상영역의 주파수 성분 0.1 Hz, 1.0 Hz, 10 Hz에 대한 최대 추정오차 e_{f_p} 와 최대 밴드폭 B_p 을 표 4.1 및 표 4.2에 각각 나타내었다.

5. 실측데이터의 적용 예

그림 5.1은 개발된 MEM 알고리즘의 분석능력을 확인하기 위하여 15층의 아파트건물을 대

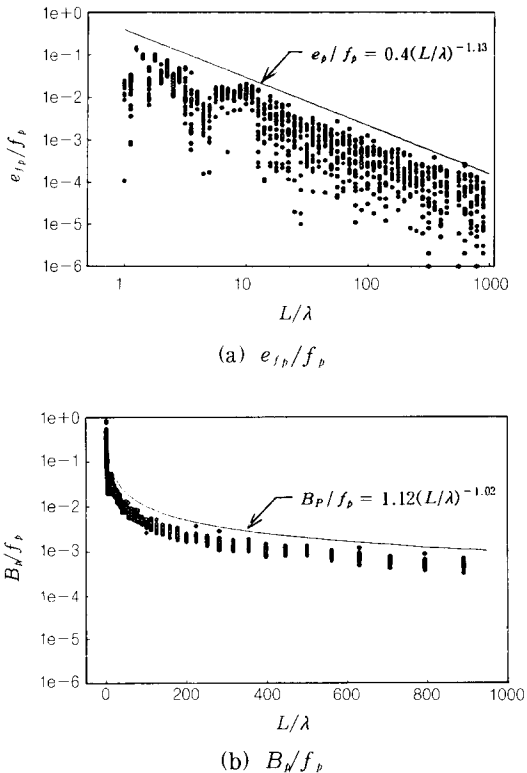


그림 4.1 MEM 스펙트럼의 오차 추정

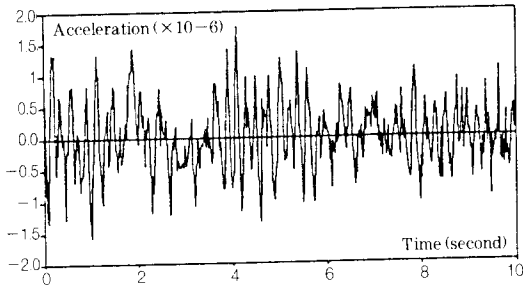
표 4.1 측정데이터 길이에 따른 최대 추정오차

데이터 길이 (Second)	0.1 Hz	1.0 Hz	10 Hz
10	0.039900	0.025130	0.018629
20	0.015489	0.011482	0.008512
30	0.009796	0.007262	0.005383
40	0.007077	0.005247	0.003889
50	0.005500	0.004077	0.003022
60	0.004476	0.003318	0.002460
70	0.003760	0.002788	0.002067
80	0.003234	0.002397	0.001777
90	0.002831	0.002098	0.001556
100	0.002513	0.001863	0.001381

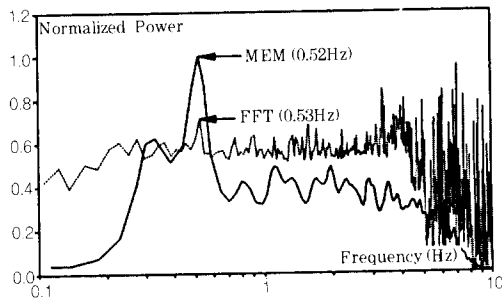
표 4.2 측정데이터 길이에 따른 최대 밴드폭

데이터 길이 (Second)	0.1 Hz	1.0 Hz	10 Hz
10	0.112200	0.107150	0.102328
20	0.055328	0.052838	0.050459
30	0.036587	0.034941	0.033368
40	0.027283	0.026055	0.024882
50	0.021729	0.020751	0.019817
60	0.018042	0.017230	0.016454
70	0.015417	0.014723	0.014060
80	0.013454	0.012848	0.012270
90	0.011931	0.011394	0.010881
100	0.010715	0.010233	0.009772

상으로 측정된 상시미진동(Ambient Condition)상태의 불규칙진동(Random Vibration) 데이터를 대상으로 분석된 데이터의 시간이력과 MEM과 FFT에 의한 스펙트럼을 나타낸 것이다. 측정대상 건물은 목포 연산지구에 건설된 주공아파트(59-90-15F)로써 전형적인 편복도식 정형아파트이다. 적용된 측정조건은 신호길이 30초, 샘플링간격 (Δt) 0.0214초로 예상 추정오차는 1.0 Hz에서 약 0.0073 Hz이다. 측정장치 및 측정조건 그리고 신호분석조건 등에 대하여는 참고문헌



(a) 가속도 측정결과



(b) 파워 스펙트럼 (MEM)

그림 5.1 상시미진동 데이터의 분석결과

[6]에 자세히 수록되어 있다.

MEM에 의하여 얻어진 주파수는 0.52Hz로 FEM에 의한 전산해석결과(0.48Hz)와 근접한 값을 나타내고 있어 1.0 Hz 이하의 저주파성분에 대해서도 우수한 분석능력을 보여주고 있음을 알 수 있으며, FFT의 추정결과와 비교하여 볼 때 짧은 길이의 불규칙진동 데이터를 대상으로 할 경우에도 상당히 효과적인 것을 알 수 있다. 실측데이터를 적용한 또다른 예는 참고문헌[6]에 41개의 아파트건물을 대상으로 실시된 주파수 분석결과가 제시되어 있다.

6. 결 론

저주파진동 해석에 적합한 알고리즘을 결정하기 위하여 FFT와 MEM의 특성을 비교하였으며, 비교 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

1) 한정된 데이터 및 측정조건으로부터 저주파진동의 진동특성 분석시 MEM에 의한 분석방식의 유용함을 확인하였다.

2) 스펙트럼 추정 알고리즘의 분석 및 시뮬레이션에 의한 검토결과에 따라 측정데이터의 길이에 따른 주파수의 추정오차와 분해능을 정량적으로 제시하였다.

3) 제한된 정보량으로부터 정확한 주파수 분석이 이루어지기 위한 알고리즘을 제시하고, 데이터의 적정길이를 추정하여 최적의 측정조건을 제시하였다.

본 논문은 대한주택공사의 연구비지원과 초대형 구조시스템연구센터(STRESS)의 연구협조에 의한 결과임.

참 고 문 헌

1. Cooley, J.W. and Tukey, J.W., "An algorithm for the machine calculation of complex Fourier series", Mathematics of Computation, Vol. 19, No. 90, p297-301 (1965)
2. Burg, J.P., "Maximum entropy spectral analysis", paper presented at the 37th Annual International Meeting, Soc. of Explor. Geophys., Oklahoma City, Okla, Oct. 31 (1967)
3. Akaike, H., "Fitting autoregressive models for prediction", Ann. Inst. Statist. Math, Vol. 21, p243-247 (1969a)
4. Akaike, H., "Power Spectrum estimation through autoregressive model fitting, Ann. Inst. Statist. Math., Vol. 21, p407-419 (1969)
5. 日野幹雄, "MEM 最大エントロピー法によるスペクトルの計算法", 土木學會誌, Vol. 61, 7月號, p50-54 (1976)
6. 천영수 외, "벽식구조 아파트의 고유주기 산정식제안(III)", 대한주택공사, 1997. 6.
(접수일자 : 1997. 5. 9)