

교량 진동특성 분석을 위한 실측 가속도의 적분

Integration of Measured Acceleration to Determine the Vibration Characteristics of Bridges.

이 선 구* 이 성 우** 이 문 택***
Lee, Sun-Goo Lee, Sung-Woo Lee, Mun-Taek

요 약

변위응답은 교량구조의 진동특성을 결정하는 데 중요한 인자 중의 하나이다. 계측된 가속도 데이터를 진동수 영역에서 적분하여 변위응답을 경제적이고 합리적으로 구할 수 있다. 이를 위해 계측된 가속도 데이터를 이산화하기 위해 적절한 표본추출 진동수가 제시되었다.

캔틸레버 보를 이용한 실내시험에서 직접계측된 변위와 적분된 변위는 서로 잘 일치하였다. 평가된 변위응답으로부터 구한 모우드 형상도 해석치와 근접하므로 개발된 방법은 실제로 효율적으로 사용될 수 있음을 입증하였다.

Abstract

Displacement response is one of the important parameter to determine vibration characteristics of bridge structure. Reliable estimate of displacement response is obtained economically from integration of measured acceleration data in frequency domain. Proper sampling rate of frequency in discretization process of measured acceleration is proposed.

Comparison of integrated and directly measured displacement response from laboratory experiment for a cantilever beam shows good agreement each other. Mode shape obtained from estimated displacement response also closely match with analytical result, thus the developed method is proved to be effective in practical use.

Keywords : displacement response, vibration characteristics, sampling rate of frequency, Mode shape.

* 정회원 · 인프라 구조안전연구소, 공학박사
** 정회원 · 국민대학교 토목환경공학과 교수, 공학박사
*** 삼립건설탄트 구조부, 공학석사

• 이 논문에 대한 토론을 1997년 3월 31일까지 본 학회에 보내주시면 1997년 6월호에 그 결과를 게재하겠습니다.

1. 서 론

성수대교나 삼풍 백화점 등 대형 구조물 붕괴사고의 여파로 건물이나 교량 등 대형 구조물의 안전에 대한 관심이 고조되고 있음에 따라 이들 구조물을 정량적으로 진단할 수 있는 수단이 다방면으로 모색되고 있다. 물론 경험있는 전문 기술자에 의한 육안진단이 가장 효율적이고 적절한 수단의 하나가 될 수 있겠으나, 기존의 기술인력은 제한되어 있어 모든 구조물들을 일일이 현장조사하기에는 시일이 많이 소요될 뿐만 아니라 접근이 곤란한 위치에 대해서는 평가가 소홀히 될 소지가 있다. 이들 인력에 의한 점검사항을 정량적으로 판단하고 접근이 곤란한 곳을 포함하여 포괄적으로 안전진단을 하기 위해 구조물의 동적 특성을 계측하고 이를 분석하여 건전도를 판단하는 연구가 국내외에서 활발하다.^{1,2)}

동적 실험으로부터 얻어진 자료는 다양한 수치처리 과정을 거쳐 공학적인 의미를 갖는 정보로 가공된다. 이 수치처리 과정에서의 오류는 동적 해석 결과를 크게 왜곡시킬 수 있다. 그러므로 효율적이고 적절한 처리과정을 통해 자료를 가공하는 것이 무엇보다도 중요하다.

수치처리 과정의 오류를 대별하면 기계적인 오류와 수치처리 오류로 분류할 수 있으며, 기계적인 오류는 계측기나 데이터 기록기기의 특성을 파악하고 이를 적절하게 선정하여 운용한다면 최대한 방지될 수 있다. 그러나 이산화 과정에서 데이터의 처리를 부적절하게 수행한 경우 주된 진동수 성분이 누락될 수 있고, 경우에 따라서는 원래 신호와 전혀 다른 신호로 해독될 수 있다.³⁾

본 논문에서는 수치처리에서 필수적인 이산화 과정에서 발생할 수 있는 오류를 최소화하기 위해 표본추출 진동수를 중심으로 기본적인 정현파 신호에서 나타날 수 있는 오류들을 고찰한다. 또한 캔티레버 보에 대한 실내시험을 통하여 동일한 시험 대상에 대한 가속도와 변위를 실측하고 가속도를 진동수 영역에서 이중적분하여 구한 변위와 실측 변위를 비교분석하여 적절한 표본추출 진동수를 설정할 수 있는 방법을 제시하였다. 가속도 기

록을 푸리에 변환하여 구한 정점진폭을 이용하여 구한 모드 형상과 가속도 기록을 적분하여 구한 모드 형상을 유한요소 해석을 통해 구한 모드 형상과 비교분석하였다.

가속도 기록으로부터 원하는 정보를 얻을 수 있도록 표본추출 진동수를 결정하여 자료를 이산화한 후 필터에 의해 역의 진동수 성분을 제거한다. 이 가속도 기록으로부터 수치적분하여 속도와 변위를 구한다. 대표적인 표본추출 진동수가 결정되면 이를 동일 구조물의 다른 가속도 기록에도 적용하여 후속적인 분석과정을 수행할 수 있다.

2. 계측 가속도 데이터의 오차

2.1 계측기에 의한 오차

구조물의 가속도를 계측하기 위해서는 주로 단자유도계로 설계된 변형 게이지형 가속도계가 이용된다. 가속도계는 감쇠비에 따라 그 계측할 수 있는 진동수의 영역이 정해지며 계측하는 과정에서 미소하지만 진폭과 위상이 왜곡된다. 따라서 계측할 구조물의 동적 특성에 따라 적절한 계측기를 선정하고 설치상세에 유의하면 이에 따른 오차를 최소화할 수 있다. 그림 1은 통상 사용되는 가속도계의 특성에 따른 사용범위를 보여주고 있는데 그림에서 알 수 있는 바와 같이 가속도계는 어떤 감쇠비를 갖고 있더라도 구조물의 진동수와 가속도계의 진동수비가 0.5보다 작은 경우에 오차가 적으므로 이를 고려하여 선정해야 한다.⁴⁾

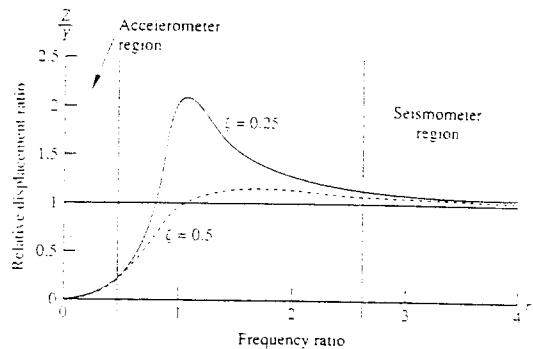


그림 1 가속도계의 특성에 따른 사용범위

2.2 기록 과정에서의 오차

경험미숙으로 인한 관측자의 오독과 오기록 등이 이 범주에 속하는 오차이다. 이는 관측자를 훈련시키고 다중으로 기록하며 관측자를 중복시키는 등의 방법을 통해 오차를 줄일 수 있다. 이러한 오차는 기록과정을 표준화하고 자동화하면 최소화할 수 있다.³⁾

2.3 수치처리에 따른 오차

수치처리 과정에서 발생하는 오차는 이산화 장치에서 생기는 오차와 랜덤오차로 구분될 수 있다.

랜덤오차는 기계적인 특성에 관계없이 생기는 잡음이나 마찰 및 환경적인 요인에서 발생하는 것으로서, 통상 가우스 분포를 나타내고 저주파에서 큰 값을 나타낸다. 이 오차는 계측기 선정에 유의하고 필터링이나 기타의 방법으로 잡음을 제거하고 다중으로 기록하여 통계적인 처리과정을 거쳐서 줄일 수 있다.³⁾

수치처리 과정에서 아날로그 데이터는 디지털 데이터로 변환되어 처리되는 데, 이 때 표본추출 주파수(f_s)와 기록시간(T)에 따라 분석될 수 있는 최대 진동수(f_{max})와 진동수의 해상도(Δf)가 결정된다. 아날로그 신호에서 f_{max} 이상이 되는 진동수 성분이 없는 경우, 이 신호는 표본추출 진동수 f_s 가 $2f_{max}$ 이상일 때 유일하게 재현될 수 있으며 이를 표본추출 정리라고 한다. 또한 이 최소한의 표본추출 진동수를 나이퀴스트(Nyquist) 진동수라고 한다. 표본추출 정리를 정현파 신호에 대해 고려해 보면 다음과 같다. 표본추출 주기를 T_s 라고 할 때 시간 $t=nT_s$ 에서 정현파 신호 $x(t)=A\sin(\omega t+\alpha)$ 의 이산화된 표본출력은 식(1)과 같이 표현될 수 있다.

$$x(nT_s) = A \sin(\omega nT_s + \alpha) \quad (1)$$

식(1)에서 $\theta=\omega T_s$ 라고 두면 식(1)은 정현 시계열(Sine Sequence)로 식(2)와 같이 나타낼 수 있으며, 이때 θ 를 이산화된 정현파의 이산 진동수라고 한다.

$$x(nT_s) = A \sin(n\theta + \alpha) \quad (2)$$

식(2)에서 $x(nT_s)$ 가 주기적인 정현파 시계열이 되려면, θ 가 2π 에 대한 유리수의 배수로 나타낼 수 있어야 한다. 만약, w 가 영이면 θ 도 영이 된다. $w=2\pi f_s/2$ 가 되면 이것은 지정된 표본 진동수에서 나타낼 수 있는 최대 진동수가 되며 이산 진동수 $\theta=\pi$ 에 대응된다. 결국 이산 시계열을 위한 이산 진동수의 유용한 영역은 영으로부터 π 까지가 되는 셈이다.

또한 인접한 진동수의 존재를 감지하는 능력을 결정하는 진동수 해상도(Δf)는 기록시간 T 에 의해 결정된다. 여기서 $T=NT_s=N/f_s$ 이고 $f=1/T=f_s/N$ 이다. 표본주기(T_s)에서 지정된 해상도를 얻으려면 표본의 수(N)은 $T f_s$ 또는 $T(2f_{max})$ 이상이 되어야 한다.³⁾

따라서 수치처리에 따른 오차를 줄이기 위해서는 데이터의 동적 특성, 가속도계의 특성에 따라 표본추출 진동수를 결정하는 데 유의해야 한다. 표본추출 진동수를 크게 하면 고주파 성분이 누락되며 편이한 신호로 해독될 우려가 있다. 실제 신호가 f_{max} 이상 대역에 있지 않을 때는 지정된 차단 주파수를 갖는 저역통과 필터인 항 앨리어싱(Anti-Aliasing) 필터에 통과시켜 표본에서 원치 않는 고주파수를 제거하여 오차를 줄일 수 있다.⁶⁾

3. 표본추출 진동수에 따른 오차

3.1 신호의 재현을 위한 표본추출 진동수

일반적으로 계측된 동적 기록들은 디지털 데이터로 변환되어 처리되므로, 계측 데이터를 디지털 데이터로 변환할 때 그 표본추출 주파수에 특히 유의해야 한다.

고주파 성분의 진동에서는 나이퀴스트 진동수로 표본을 추출했을 경우에는 원래 진동과 전혀 다른 진동 파형을 재현하였으며, 나이퀴스트 진동수의 1.25배 이상의 진동수로 표본을 추출했을 때 유사한 진동 파형을 재현하고, 나이퀴스트 진동수의 1.5배(고유진동수의 3배) 이상의 진동수로 표본을 추출해야 원래 진동 파형과 거의 유사한 파

형을 재현할 수 있었다.⁶⁾

3.2 가속도 적분을 위한 표본추출 진동수

교량 건물 등 대형 구조물들은 고유진동수가 저주파인 경우가 대부분이다. 이 저주파 성분들은 가속도를 적분할 때 큰 영향을 주므로 이 성분에 대한 고찰이 중요하다. 고주파 성분은 주로 잡음에 지배를 받게 되지만 비틀림이나 횡방향 휨 모드 등에서는 고주파 성분의 진동이 발생한다. 이 성분들은 적분된 변위의 성분에는 크게 기여하지 못하지만, 구조물의 진단이나 손상도 평가에 사용된다.

이를 예시하기 위하여 신호 기록으로서 정현함수에 대해 고찰하고 저주파로부터 고주파까지의 신호에 대해 반과장에 대해 수치적분한 후 이를 정해와 비교한다. 이 과정을 통하여 수치적분으로 정해에 접근하기 위한 표본추출 진동수를 판단한다.

그림 2에는 고유 진동수가 2 Hz에서 5 Hz인 신호에 대해 표본추출 진동수를 0 Hz에서 40 Hz까지 증가시키면서 적분결과를 비교한 것이고, 그림 3에는 진동수가 5 Hz에서 20 Hz인 신호에 대해 0 Hz에서 100 Hz까지 증가시키며 표본추출하여 적분한 결과를 비교한다.

그림 2와 그림 3에서 보이는 바와 같이 나이퀴스트 진동수의 3배 즉, 해석에 포함되는 구조물의

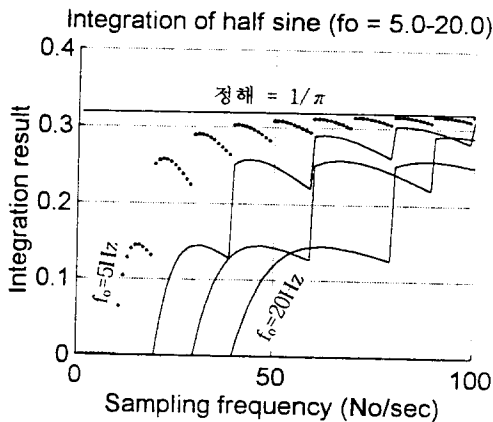


그림 2 반과장 정현파의 적분($f_0=2-5\text{Hz}$)

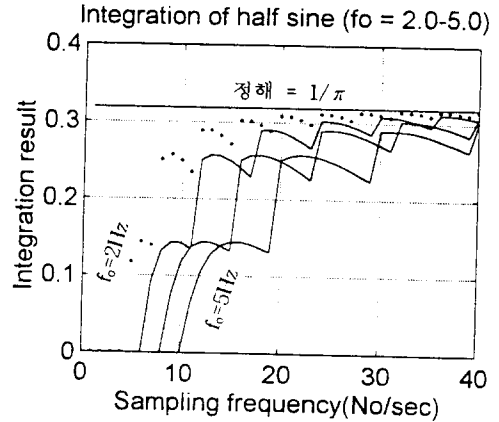


그림 3 반과장 정현파의 적분($f_0=5-20\text{Hz}$)

고유진동수의 6배 이상의 진동수로 표본을 추출해야 정해에 90% 이상으로 근접하는 적분값을 구할 수 있다. 일례로 $f_0=2.0\text{Hz}$ 인 경우 $f_s=12\text{Hz}$ 에서 적분값이 정해의 90%가 되는 0.287이 됨을 알 수 있다. 따라서 나이퀴스트 진동수의 3배 이하로 표본추출하면 적분오차가 커지게 됨을 확인하였다.

4. 가속도 데이터의 분석

4.1 대역통과 필터에 의한 보정

가속도 기록에는 일반적으로 여러 가지의 오차가 포함되어 있고, 이 오차들은 대부분 저주파와 고주파 성분에 집중되어 있다. 따라서, 이 오차가 포함되는 주파수의 영역을 결정하여 이를 대역통과 필터를 사용하여 제거한다.

가속도를 필터링할 때 그 한계를 결정하는 데는 가속도의 주파수 특성, 기록의 유지시간, 가속도계의 고유진동수, 필터의 특성 등을 고려하여 결정된 필터를 통해 오차를 제거하면서 기록의 성질을 변화시키지 않는 대역의 한계를 정한다. 고주파 한계는 해석시 관심대상이 되는 진동수의 한계와 나이퀴스트 진동수 중에서 작은 값으로 결정한다. 저주파의 한계는 가속도의 시간이력과 적분결과 얻어진 속도와 변위의 특성을 관찰하여 결정한다.

대역통과 필터를 설계함에 있어서 IIR 필터나

FIR 필터는 계산량이 적은 장점이 있으나, 위상차가 비선형이므로 이를 해결하려면 전 대역 통과 필터가 필요하다. FIR 필터의 경우에는 위상차를 선형으로 설계할 수 있으나 필터의 차수가 커져서 계산량이 많아지는 단점이 있으며 두 가지 모두 초기 데이터의 왜곡을 피할 수 없다.

시간영역 필터링의 단점을 보완할 수 있는 필터가 주파수영역 필터이다. 이 필터링 과정은 입력 데이터를 푸리에 변환을 통해 주파수 영역으로 변환시키고 필터링시 필요로 하는 특성을 가진 필터의 성분을 구한 후 이것을 데이터의 주파수 성분에 곱한다. 이때 필터의 위상은 영이므로 필터링을 통한 위상차는 발생하지 않는다. 이 과정이 끝나면, 역 푸리에 변환 과정을 통하여 데이터를 시간영역으로 변환시킨다. 이렇게 얻어진 데이터는 원하는 주파수 대역을 갖는 데이터의 시간이력이다.⁸⁾

4.2 속도와 변위의 계산

필터링이 완료되면 속도와 변위는 가속도 기록을 적분하여 구할 수 있다. 교량이나 구조물에서 계측되어 표본추출된 가속도 기록을 a(n)이라고 하면, 디지털 데이터인 가속도에 대한 푸리에 변환결과는 식(3)과 같이 나타낼 수 있다.²⁾

$$A(w) = \frac{1}{N} \sum_{n=0}^{N-1} a(n) e^{-jwn} \quad (3)$$

푸리에 변환의 성질을 이용하여 속도와 변위에 대한 푸리에 변환을 하면 식(4)와 같이 나타낼 수 있다.

$$V(w) = \frac{A(w)}{jw} \quad (4)$$

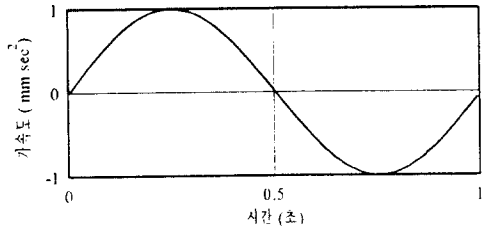
$$D(w) = \frac{A(w)}{-w^2}$$

또한, 식(4)를 역변환하면 디지털 데이터인 속도와 변위를 식(5)와 같이 구할 수 있다.

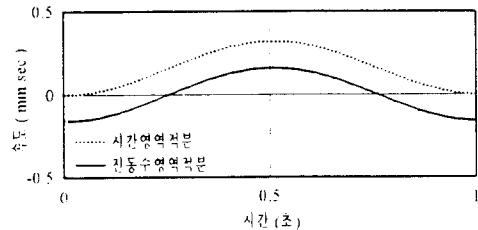
$$v(n) = \sum_{k=0}^{N-1} V(w) e^{jkw} \quad (5)$$

$$d(n) = \sum_{k=0}^{N-1} D(w) e^{jkw}$$

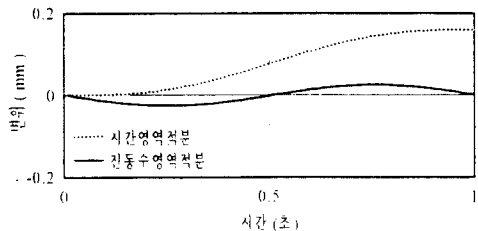
일반적으로 적분결과는 고주파 성분보다는 저주파 성분의 영향을 더 많이 받는다. 저주파 성분의 오류가 포함된 가속도 기록을 적분하여 속도와 변위를 구할 경우 동적 실험을 한 구조물의 거동과 상이한 결과를 초래할 수도 있다. 따라서 오차 보정을 적절하게 하고 데이터 처리를 적절하게 할 수록 더 정확한 속도와 변위를 구할 수 있다.



(a) 계측된 가속도



(b) 적분된 속도



(c) 적분된 변위

그림 4 가속도에 대한 시간영역과 진동수 영역에서의 적분 비교

4.3 가속도 기록의 적분

가속도 기록으로부터 속도나 변위를 구하려면 가속도 기록을 순차적으로 적분해야 한다. 이때 적분을 시간영역에서 하게 되면 그림 4에서 점선과 같이되어 실제 거동과 판이한 결과를 얻게 된

다. 따라서 주기적인 신호가 반복되는 가속도 기록은 진동수 영역에서 적분을 해야 원하는 속도나 변위기록을 그림 4의 실선과 같이 구할 수 있다.

4.4 표본추출 진동수의 결정

본 논문의 고찰에서 알 수 있듯이 신호처리에 있어서 표본추출 진동수의 선정은 중요하다. 일반적으로 동적 실험에서는 대상구조물의 고유진동수를 미리 정확하게 알 수 없으므로, 나이퀴스트 진동수를 결정하기 곤란하다.

따라서 본 연구에서는 기준점의 계측 기록에 대하여 해석적으로 구하거나 통계적인 경험으로부터 도출된 고유 진동수에 따라 제 1 모드 고유진동수의 네 배에 해당하는 표본추출 진동수를 사용하여 신호기록으로부터 표본을 추출한다. 나이퀴스트 진동수의 5%에 상당하는 상하한 진동수 대역을 진동수 영역에서 필터링하고, 스펙트럼 분석을 통해 고유 진동수를 도출하여 잡음이 아닌 동적 거동 신호라고 판단되는 진동수가 모두 분석에 참여하도록 반복적으로 계산한다.

표본추출 진동수가 결정되면 가속도 기록을 적분하여 실측된 변위기록과 비교분석하여 이것이 일치하는 지를 판단하며, 이것이 일치하면 그 진동수를 구조물에 대한 표본추출 진동수로 결정하여 여타 계측점의 분석을 위한 표본추출 진동수로 결정한다.

결국 기준점에서 정확한 데이터에 의해 표본추출 진동수와 필터가 결정되면 다른 부분의 가속도 기록은 이 결정된 기준치를 활용하여 동적 특성을 적절하게 추출할 수 있다.

5. 캔티레버 보에 대한 계측 및 분석

5.1 계측 개요

실험 대상으로서 단면이 $2.4 \times 1.8 \times 77.0\text{cm}$ 의 각형 강봉을 그림 5와 같이 장치하고 번호로 표시된 단면에 변위계와 가속도계를 각각 설치하고 변위와 가속도를 실측하였으며, 9번 위치에는 변위계와 가속도계를 항상 설치하고 응답을 계측하였다. 9번 점의 응답을 기준으로 모우드 진폭이나 변위

를 정량적으로 비교할 수 있도록 하고 추출된 모우드 형상 데이터의 상대적인 수치를 통하여 모우드 형상을 추정하였다.¹¹⁾

가속도 기록과 변위 기록을 각각 10Hz, 20Hz, 30Hz, 40Hz, 50Hz, 75Hz, 100Hz의 진동수로 표본추출하여 이산화한 기록을 분석하였다.

5.2 계측 데이터의 분석

계측한 가속도 기록의 고유진동수를 구하기 위해 75 Hz, 100Hz, 40Hz의 진동수로 표본추출하여 이산화된 데이터를 FFT분석하여 진폭 스펙트럼과 위상각 변화를 분석한 결과를 그림 6, 그림 7, 그림 8과 같이 각각 도시하였다.

그림 6에서는 표본추출 진동수가 75Hz이므로 $f_1=4.8\text{Hz}$ 와 $f_2=29.1\text{Hz}$ 에서 진폭의 정점과 위상의 180도 변화가 명확하게 나타나므로 상기 추출된 진동수들이 분석대상 캔티레버 보의 일치 및 이차 고유 진동수임을 알 수 있다.

그림 7은 표본추출 진동수가 100Hz인 경우이며 추출되는 진동수들은 동일하나 잡음의 성분이 위상분석에서 복잡한 결과를 주며 이 경우 추출되는 결과가 75Hz로 표본추출한 결과와 동일하므로 과다하게 표본추출되었음을 알 수 있다.

그림 8은 표본추출 진동수가 40Hz인 경우로서 분석될 수 있는 최대 진동수가 20Hz이어서 그림 6이나 그림 7에서 추출된 이차 고유 진동수보다 저차로 천이된 진동수에서 2차 모우드의 진폭 정점이 위상각의 변화와 함께 나타나는 확인할 수 있으므로 표본추출 진동수가 과소하게 결정된 것을 확인할 수 있다.

따라서 실험대상 캔티레버 보에 대한 표본추출 진동수는 75Hz가 적절한 것으로 판단할 수 있다.

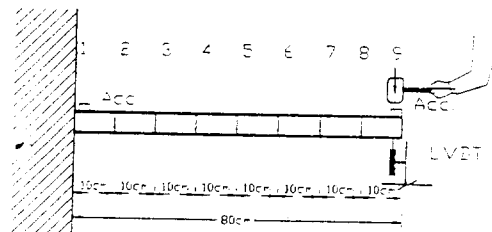


그림 5 실험대상 캔티레버 보

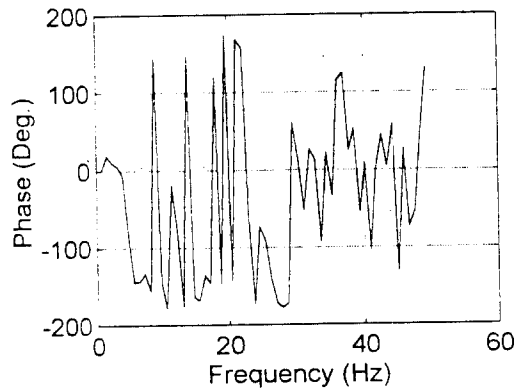
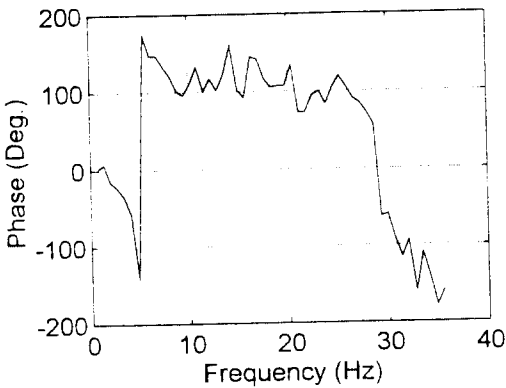
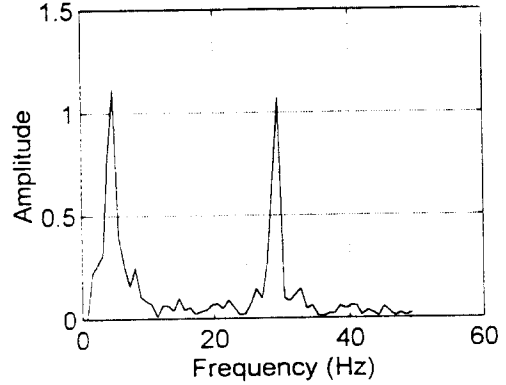
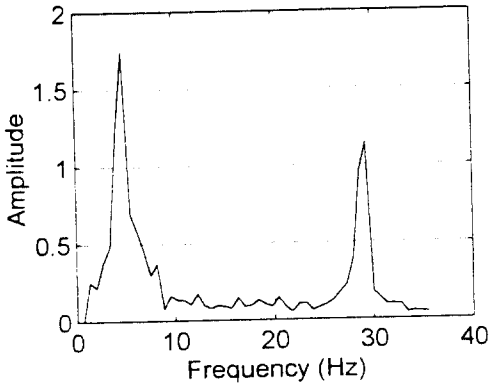


그림 6 표본추출 진동수가 75Hz인 경우

그림 7 표본추출 진동수가 100Hz인 경우

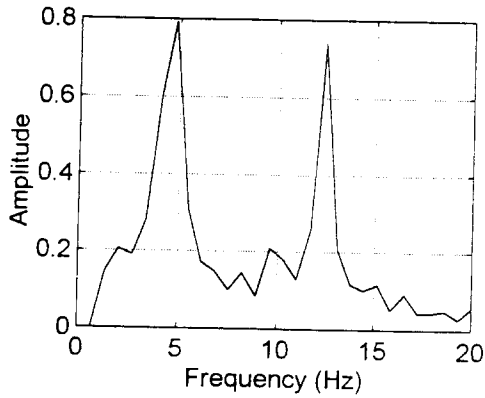
6. 변위 응답과 모드 형상

그림 5에서 보인 실험 대상 캔티레버 보에 대하여 표시된 계측점에서 가속도를 계측하고 이를 계측점별로 푸리에 변환하여 고유진동수의 정점에 대한 모드 진폭을 구하였으며^{9), 10)} 이를 기준점의 진폭에 대해 정규화시켜 모드 형상을 구하였다. 가속도 기록을 진동수 영역에서 이중적분하여 변위를 구하였으며, 이를 정규화시켜 변위응답을 이용한 모드 형상을 구하였다. 정규화 과정을 표 1에 수치적으로 기술하였다. 표 1에서 알 수 있듯이 3번 계측점 이외에는 변위응답과 해석치의 오차가 모두 5% 이내이므로 해석시 이상화된 경계 조건을 감안한다면 가속도로부터 추출된 변위응답에 의해 신뢰성있는 모드 형상을 추출할 수 있을

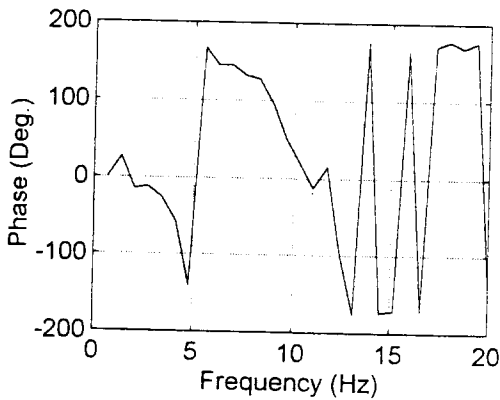
것이다.

일례로 그림 9는 7번 계측점에서 계측된 가속도 기록이며 그림 10에는 가속도를 이중적분하여 구한 변위 응답과 실측 변위를 비교하였다. 그림 10에서 알 수 있듯이 가속도 기록으로부터 구한 변위와 실측변위는 거의 완전하게 일치하고 있다.

추출된 제 1 모우드의 형상을 그림 11에 도시하였다. 그림 11에서 고찰하면 변위응답에 의한 모드 형상은 해석치와 잘 일치하지만 푸리에 변환에 의한 진폭을 정규화시켜서 구한 모드 형상은 해석치와 어느 정도 차이를 보이므로 변위응답을 통해 모드 형상을 추출하는 것이 적절할 것으로 판단된다.



(a) FFT amplitude (fs = 40 Hz)



(b) FFT phase (fs = 40 Hz)

그림 8 표본추출 진동수가 40Hz인 경우

표 1 정규화된 제 1모드 데이터

측점	FFT 진폭	FFT 정규화	변위 응답	변위 응답 정규화	해석 결과	변위 응답/ 해석
1	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	
3	0.247	-0.001	0.013	-0.120	-0.097	1.23
5	32.93	-0.171	0.038	-0.346	-0.339	1.02
7	92.34	-0.480	0.074	-0.678	-0.658	1.03
9	192.3	-1.000	0.110	-1.000	-1.000	

7. 결 론

본 연구에서는 기본적인 정현파 신호에 대하여 도식적인 고찰과 적분 및 진동수 추출을 통해 표본추출 주기에 따른 신호를 적절하게 분석할 수

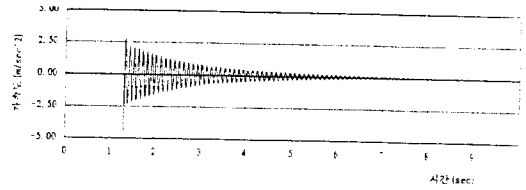


그림 9 계측된 가속도 응답

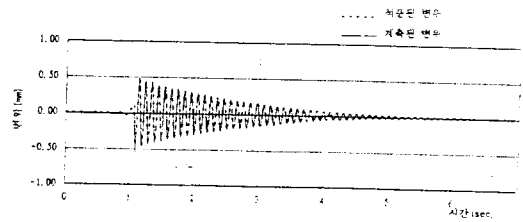


그림 10 적분된 변위와 실측 변위의 비교

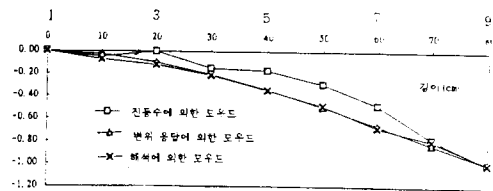


그림 11 제 1 모드 형상

있는 방법을 설정하였고, 이를 캔티레버 보에 대한 실내시험 결과와 비교분석하여 다음의 결론을 얻을 수 있었다.

1. 고주파 성분의 진동에서는 나이퀴스트 진동수로 표본추출했을 경우에는 푸리에 변환으로부터 고유진동수를 적절하게 추출할 수 없었으며, 나이퀴스트 진동수의 1.5배 이상의 진동수로 표본추출해야 계측기록의 고유진동수를 완전하게 추출할 수 있었다.

2. 저주파 성분을 갖는 진동에서는 공학적으로 의미있는 적분된 값을 구하려면 고유진동수의 6배 이상의 진동수로 표본을 추출해야 한다. 따라서 적절한 표본추출 주기는 구조물의 동적인 특성에 따른 고유주기에 따라 달라지므로 사전의 해석적인 방법이나 경험적으로 표본추출 진동수의 상한선을 적절하게 결정해야 한다.

3. 시험대상 캔티레버 보에 충격을 가하고 계측

된 가속도 기록에 대해 진폭과 위상의 스펙트럼을 구하고 이를 분석하여 개별 모드에 대한 고유 진동수를 구할 수 있었다.

4. 가속도 데이터를 계측하고 이를 진동수 영역에서 적분하여 변위를 구할 수 있었으며, 변위계로 실측된 변위와 잘 일치하였다.

5. 수집된 가속도를 푸리에 변환하고 진폭과 위상을 이용하여 모우드 형상을 추정할 수 있었으며, 가속도를 이중적분하여 구한 변위응답을 이용한 모우드 형상이 해석치에 더 근접하게 일치하므로 변위응답을 이용하여 모우드 형상을 추정하는 것이 적절할 것으로 사료된다.

6. 본 연구의 결과를 현장계측에 적용할 경우 변위계를 고정시킬 수 없어서 변위계측이 곤란할 경우 저렴한 비용으로 설치할 수 있는 가속도계를 통한 가속도를 계측하여 이를 수치적분함으로써 동적인 변위를 간접적으로 용이하게 계측할 수 있다. 또한 모우드 형상도 계산된 변위로부터 경제적으로 추출할 수 있을 것으로 판단된다.

참 고 문 헌

1. P. Paultre, J. Proulx and M. Talbot, "Dynamic Testing Procedures for Highway Bridges using Traffic Loads.", J. of Struct. Eng., 121(2), Feb., 1995, 362-376.
2. 이성우, 배두병, 외, 강변도시고속도로 PRECAST SEGMENTAL 교량의 하중재하 시험에 관한 연구, 국민대학교 구조안전연구소 연구보고서 KMU/SSRC-95/6, 1995.
3. J. Dunncliff and G. E. Green, Geotechnical Instrumentation for Monitoring Field Performance, John Wiley & Sons, Inc., 1993.
4. D. J. Inman, Engineering Vibration, Prentice Hall, Inc., 1994.
5. R. D. Strum and D. E. Kirk, Comtemporary Linear System s using MATLAB, PWS Publishing Company, 1994.
6. J. S. Bendat, A. G. Piersol, Engineering Applications of Correlation and Spectral Analysis, John Wiley & Sons, 1980.
7. 이선구, "동적모니터링을 통한 정상교통상태 교량의 유지관리체계에 관한 연구", 국민 대학교 토목환경공학과 공학박사 학위논문, 1995.
8. 박창호, 이동근, "주파수 영역에서의 가속도 기록 보정", 대한토목학회 논문집, 제12권 제 4호, 1992, 71-79.
9. D. J. Ewins, Modal Testing: Theory and Practice, Research Studies Press Ltd., England, 1986.
10. J. S. Bendat and A. G. Piersol, Random Data analysis and measurement procedures, John Wiley & Sons, Inc., 1986.
11. 이문택, "실측 가속도 해석을 통한 변위 응답 및 모드형상 추정", 국민대학교 토목환경공학과 공학석사 학위논문, 1996.

(접수일자 : 1995. 7. 20)