

교량의 동적 특성 분석을 위한 가속도 데이터의 해석  
Analysis of Measured Acceleration Data to Obtain Dynamic  
Characteristics of Bridges.

\*이 선 구<sup>1)</sup>, 이 성 우<sup>2)</sup>

\*Lee Sun Goo<sup>1)</sup> and Lee Sung Woo<sup>2)</sup>

Abstract

In Extracting the dynamic parameters for estimating the load carrying capacity and integrity of bridges, both the instrumentation and the processing the data plays important role . When the fixed point can not be secured, it is difficult and expensive to measure dynamic displacements. Even if the displacement is obtained through the integration of the acceleration data, the results can be quite different from the real behavior, because the main frequency contents can be leaked during discretized data processing.

The instrumentation is used for measurements, and every measurement involves error and uncertainty, such as systematic, conformance, environmental, observational, sampling, and ranmom error. Systematic and conformance error can be remedied through the proper selection and installation of the instruments, but sampling and random errors could not have been corrected properly and it becomes the limitation for using acceleration data.

In this paper, the errors which can be occurred in numerical processing of dynamic data are referred, and the method to select proper sampling rate for the structural frequency range are proposed. Using the proposed method, the displacement response of the structures can be economically obtained from the measured acceleration record, and this procedure can be used properly to estimate the integrity of the bridges and infrastructures subjected to dynamic loads.

요 지

교량의 내하력이나 건전도 평가에 있어서 중요한 역할을 하는 동적 매개변수들을 계측함에 있어서, 계측장치를 포함하는 적절한 계측계획 뿐만 아니라 계측된 자료를 처리하는 과정이 계측결과로부터 정확한 자료를 구하는 데 큰 영향을 미친다. 특히, 동적변위를 계측시 고정점을 확보할 수 없는 경우에는 변위계의 설치가 곤란하여 변위응답의 계측에 어려움을 겪고 있으며, 가속도의 적분을 통해 이를 구하는 경우도 이산처리 과정에서 주요한 진동수 성분이 누락될 수 있어 실제 거동과 크게 다를 수 있다.

동적계측에서 주로 측정되는 가속도 기록에는 가속도계나 기록장비의 특성에 따라 또는 자료의 이산화 과정에서 오차들이 발생하게 된다. 계측기계의 특성에 따른 오차는 계측기 제작기술의 발달로 어느정도 보정이 되고 있지만, 이산화 과정의 오차는 지금까지 정확한 보정을 하지 못해 가속도 기록을 이용하는 데 한계가 있었다.

따라서, 가속도 기록의 수치처리 과정에서 발생할 수 있는 오차가 언급되며, 특히 이산화 처리 과정에서 표본화 주파수를 적절하게 선정할수 있는 방법을 제시한다. 제안된 방법을 이용할 경우, 동적하중에 따른 변위응답을 가속도 기록으로부터 정확하게 구할 수 있으므로, 교량 또는 동하중을 받는 대형 구조물의 건전도 평가에 크게 기여할 수 있을 것으로 사료된다.

1) 정희원 , 국민대학교, 토목환경공학과, 박사과정 수료, (주)동명기술공단 이사, 구조기술사.

2) 정희원 , 국민대학교, 토목환경공학과, 부교수, 공학박사.

## 1. 서론

성수대교나 삼풍 백화점, 등 대형 구조물 붕괴사고의 여파로 건물이나 교량, 등 기간산업을 구성하는 대형 구조물의 안전에 대한 진단과 예방이 초미의 관심사로 등장하고 있는 때를 즈음하여, 이들 구조물을 정량적으로 진단할 수 있는 수단이 다방면으로 모색되고 있다. 물론 경험있는 전문 기술자에 의한 진단이 가장 효율적이고 적절한 수단이 될 수 있겠으나, 기존의 기술인력은 제한되어 있어 모든 구조물들을 일일이 현장조사하기에는 시일이 많이 소요될 뿐만 아니라 접근이 곤란한 곳은 안전진단이 소홀할 소지가 있다. 이들 인력에 의한 점검사항을 정량적으로 판단하고 접근이 곤란한 곳을 포함하여 포괄적으로 안전진단을 할수 있도록 구조물의 동적 특성을 계측하고 이를 분석하여 건전도의 판단 기준으로 하는 연구가 국내외에서 활발하다.<sup>[1]</sup>

동적실험으로부터 얻어진 자료들은 다양한 수치적인 처리과정을 거쳐, 공학적인 의미를 갖는 정보로 가공된다. 이 수치적인 처리과정에서의 오류는 동적해석 결과를 크게 왜곡시킬 수 있다. 그러므로, 효율적이고 적절한 처리과정을 통해 자료를 가공하는 것이 적절한 계측결과를 구하는데 무엇보다도 중요하다.

이 오류들을 대별하면 기계적인 오류와 수치처리적인 오류로 분류할 수 있는 바, 기계적인 오류는 계측기나 기록기의 특성을 파악하고 이를 적절하게 선정하여 운용한다면 최대한 방지할 수 있다. 그러나, 이산화 과정에서 데이터의 처리를 부적절하게 수행할 경우 주요한 진동수 성분이 누락될 수 있고, 경우에 따라서는 원래 신호와 전혀 다른 신호로 해득될 수 있다.<sup>[2]</sup>

따라서, 본 논문에서는 수치처리에서 필수적인 이산화 과정에서 발생할 수 있는 오류를 최소화하도록 표본추출 주기에 초점을 맞추어, 기본적인 정현파 신호에 대해 그 오류들에 대해 면밀하게 고찰한다. 동일 시편에 대한 가속도와 변위를 실측하고 가속도를 이중적분하여 구한 변위와 실제 변위를 비교분석함으로써 적절한 표본추출 주기를 설정할 수 있는 방법을 설정하며, 고찰된 이론을 확인한다.

가속도 기록으로부터 원하는 정보를 얻을수 있도록 표본화 주기를 결정하여 자료를 이산화한 후, 필터에 의해 역의 주파수 성분을 제거한다. 이 수치처리된 가속도 기록으로부터 수치적분하여 속도와 변위를 구한다. 표본화 주기를 결정하는 과정에서 대표적인 가속도로부터 수치적분된 변위와 실측된 변위를 비교분석하여 적절한 표본화 주기를 결정하며, 이를 동일 구조물의 다른 가속도 기록에도 적용하여 후속적인 분석과정을 수행할 수 있다.

## 2. 가속도 기록의 오차

### 2.1. 계측기에 의한 오차

교량의 동적 성분을 기록하기 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 동적특성에 따라 적절한 계측기를 선정하고 설치상세에 유의하여 이에 따른 오차를 최소화해야 할 것이다.<sup>[3]</sup>

### 2.2. 기록 과정에서의 오차

경험미숙으로 인한 관측자에 따른 오차와 오독과 오기록, 등이 이 범주에 속하는 오차이며, 이는 관측자를 훈련시키고 기록을 다중으로 하고 관측자를 중복시키는 등의 방법으로 줄일 수 있고, 기록과정을 표준화하고 자동화하면 그 오차를 최소화할 수 있다.<sup>[2]</sup>

### 2.3. 수치처리에 따른 오차

수치처리 과정에서 발생하는 오차를 대별하면 이산화 장치에서 생기는 것과 랜덤오차로 구분할 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 소거하고 다중으로 기록하여 통계적인 처리과정을

거침으로서 줄일 수 있다.<sup>[4]</sup>

수치처리 과정에서 아나로그 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( $\Delta f$ )가 결정된다. 아나로그 신호에서  $f_{max}$  이상이 되는 진동수 성분이 없는 경우, 이 신호는 표본추출 진동수  $f_s$ 가  $2 f_{max}$  이상일 때 유일하게 재현될 수 있다. 이 최소한의 허용 표본추출 진동수를 나이퀴스트(Nyquist) 진동수라고 하며, 이 정리를 표본추출 정리라고 한다.

$f_s = 1/T_s$ 라고 하면, 표본 출력은 다음과 같이 된다.

$$\begin{aligned} x(nT_s) &= x(t) |_{t=nT_s} \\ &= A \sin(\omega t + \alpha) |_{t=nT_s} \\ &= A \sin(\omega nT_s + \alpha) \end{aligned} \quad (1)$$

여기서,  $\theta = \omega T_s$ 라고 두면, 이것은 정현 시계열로 나타낼 수 있으며, 이때  $\theta$ 를 이산 시간 정현파의 이산 진동수라고 한다.

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

즉,  $\theta = \omega T_s = 2\pi f T_s = 2\pi f/f_s$ 의 관계가 있으며,  $x(n)$ 이 주기적인 정현파 시계열이 되려면,  $\theta$ 가  $2\pi$ 에 대한 유리수의 배수로 나타낼 수 있어야 한다.

만약,  $\omega$ 가 영이면  $\theta$ 도 영이 된다.  $\omega = 2\pi f_s/2$ 이면 이것은 지정된 표본 진동수에서 나타낼 수 있는 최대 진동수가 되며 이것은 이산 진동수  $\theta = \pi$ 에 대응한다. 결국, 이산계를 위한 이산진동수의 유용한 영역은 영으로부터  $\pi$ 까지이다.

또한, 인접한 진동수의 존재를 감지하는 능력을 결정하는 진동수 해상도( $\Delta f$ )는 기록시간  $T$ 에 의해 결정된다. 표본주기( $T_s$ )에서 지정된 해상도를 얻으려면 표본의 수는  $N = T f_s \geq T 2f_{max}$  이상이 되어야 하며, 이 계수들 사이의 관계는 다음과 같다.<sup>[7]</sup>

$$\begin{aligned} T &= NT_s = N/f_s \\ \Delta f &= 1/T = f_s/N \end{aligned} \quad (3)$$

따라서, 데이터의 동적 성질, 가속도계의 특성에 따라 표본화 주기를 결정하는 데 유의해야 한다. 표본화 주기를 크게하면 고주파성분이 누설되며 판이한 신호로 해독될 우려가 있다. 실제 신호가  $f_{max}$ 의 제한대역을 갖지 않을 때는 지정된 차단 주파수를 갖는 저역통과 필터인 항 앨리어싱(Anti-Aliasing) 필터에 통과시켜 표본에서 원치않는 고주파수를 제거할 수 있다.

### 3. 표본추출 진동수에 따른 오차

#### 3.1. 신호의 재현을 위한 표본추출 진동수

일반적으로 계측된 동적기록들은 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 유사한 진동파형을 재현하였으나, 나이퀴스트 진동수의 1.5배(고유진동수의 3배) 이상의 진동수로 표본을 추출해야 원래 진동파형과 거의 유사한 파형을 재현할 수 있었다.

#### 3.2. 적절한 적분을 위한 표본추출 진동수

토목,건축, 등 대형 구조물들은 고유진동수가 저주파인 경우가 대부분이다. 또한, 이 저주파 성분들은 적분할 때 큰 영향을 주므로 이 성분에 대한 고찰이 중요하다.

또한, 대형 구조물의 동적계측에서 고주파 성분은 주로 잡음에 지배를 받게 되지만, 비틀이나 횡방향 휨 모드, 등에서는 고주파 성분의 진동을 발생시킨다. 이 성분들은 적분된 변위의 성분에는 크게 기여하지 못하지만, 고차 모드의 고유 진동수에 해당하므로 구조물의 진단이나 손상도 평가에 사용된다. 따라서, 잡음 성분을 제외한 모든 성분을 해석에 적절하게 포함시켜야 공학

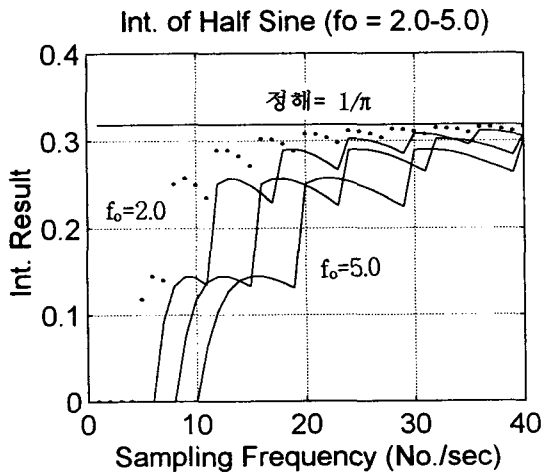
적인 의미를 가질 수 있는 계측결과를 얻을 수 있다.

예시되는 신호 기록으로서 sine 함수에 대해 고찰하며, 저주파로부터 고주파까지의 신호에 대해 반파장에 대한 수치적분을 하고 이를 정해와 비교한다. 이를 통하여 수치처리로서 정해에 접근하려면 필요한 표본추출 진동수를 판단할 수 있다.

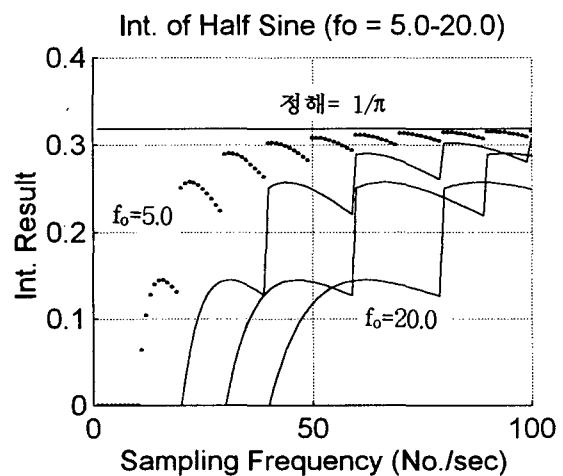
<그림 1>은 고유주기가 2.0Hz에서 5.0Hz인 신호에 대해 표본추출 진동수를 0Hz에서 40Hz 까지 증가시키면서 적분결과를 비교한 것이고, <그림 2>는 고유주기가 5.0Hz에서 20.0Hz인 신호에 대해 표본추출 진동수를 0Hz에서 100Hz 까지 증가시키면서 적분결과를 비교한 것이다.

도시된 그림에서 알 수 있듯이, 진동수가 큰 경우에는 비교적 적분값이 빠르게 수렴하지만 진동수가 낮은 경우에는 수렴속도가 느린 것을 볼 수 있다. 또한, 표본추출 진동수가 가속도 신호의 기본진동수에 대한 정수배가 될 때, 급속하게 수렴되는 것을 알 수 있다.

결국, 나이퀴스트 진동수의 3 배 즉, 해석에 포함되는 구조물의 고유진동수의 6 배 이상의 진동수로 표본을 추출해야 정해에 90% 이상으로 근접하는 적분값을 구할 수 있다.



<그림 1> 고유진동수가 2.0-5.0 Hz인 경우



<그림 2> 고유진동수가 5.0-20.0 Hz인 경우

#### 4. 가속도 데이터의 분석

##### 4.1. 대역통과 필터에 의한 보정

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

가속도를 필터링할 때 그 한계를 결정하는 데는 가속도의 주파수 특성, 기록의 유지시간, 가속도계의 고유진동수, 필터의 특성등을 고려하여 결정된 필터를 통해 오차를 제거하면서, 기록의 성질을 변화시키지 않는 대역의 한계를 정한다. 고주파의 한계는 해석시 관심을 가지는 주파수의 한계와 보정 후 얻는 데이터의 나이퀴스트 주파수 중에서 작은 값으로 결정한다. 저주파의 한계는 가속도의 시간이력 곡선과 적분결과 얻어진 속도와 변위 시간이력의 성질을 관찰하여 결정한다.

대역통과 필터를 설계함에 있어서 IIR(Infinite Impulse Filter)나 FIR(Finite Impulse Filter)는 계산량이 적은 장점은 있으나, 위상차가 비선형이어서 이 문제를 해결하려면 All-Pass 필터가 필요하며, FIR 필터의 경우에는 위상차를 선형으로 설계할 수 있으나 필터의 차수가 커져서 계산량이 많아지는 단점이 있다. 또한 두가지 모두 초기 데이터의 왜곡을 피할 수 없다.

시간영역의 필터링의 단점을 보완할 수 있는 필터가 주파수 영역 필터이다. 이 필터링 과정은 입력 데이터를 FFT(Fast Fourier Transform)를 통해 주파수 영역으로 변환시킨 다음, 필터링시 필요로 하는 특성을 가진 필터의 성분을 구한 후, 이 필터 성분을 각각 데이터의 주파수 성분에

곱한다. 이때, 필터의 위상은 영이므로 필터링을 통한 위상차는 발생하지 않는다. 이 과정이 끝나면, IFFT(Inverse Fast Fourier Transform)의 과정을 통하여 데이터를 시간영역으로 변환시킨다. 여기서 얻어진 데이터는 원하는 주파수 대역을 갖는 데이터의 시간이력이 된다.<sup>[4]</sup>

#### 4.2. 속도와 변위의 계산

속도와 변위는 가속도 기록을 적분하여 구할 수 있다. 교량이나 구조물에서 계측되어 표본추출된 가속도 기록을  $a(n)$ 이라고 하면, 디지털 데이터인 가속도에 대한 FFT결과는 다음 식으로 나타낼 수 있다.<sup>[7]</sup>

$$A(\omega) = \frac{1}{N} \sum_{n=0}^{N-1} a(n) e^{-j\omega n} \quad (4)$$

속도와 변위에 대한 FFT결과는 푸리에 변환의 성질을 이용하면 (식 5)와 같이 변환하여 나타내어질 수 있다.

$$\begin{aligned} V(\omega) &= \frac{A(\omega)}{j\omega} \\ D(\omega) &= \frac{A(\omega)}{-\omega^2} \end{aligned} \quad (5)$$

또한, (식 5)를 역변환하면 시간영역 디지털 데이터인 속도와 변위를 (식 6)과 같이 구할 수 있다.

$$\begin{aligned} v(n) &= \sum_{k=0}^{N-1} V(\omega) e^{jk\omega} \\ d(n) &= \sum_{k=0}^{N-1} D(\omega) e^{jk\omega} \end{aligned} \quad (6)$$

일반적으로 적분결과는 고주파 성분보다는 저주파 성분의 영향을 더 많이 받으므로, 저주파 성분의 오류가 포함된 가속도 기록을 적분하여 속도와 변위를 구할 경우 동적실험을 한 구조물의 거동과 상이한 결과를 초래할 수도 있다. 따라서, 오차보정을 적절하게 하고 데이터 처리를 적절하게 할수록 더 정확한 속도와 변위를 구할 수 있다.

#### 4.4. 가속도 기록의 적분

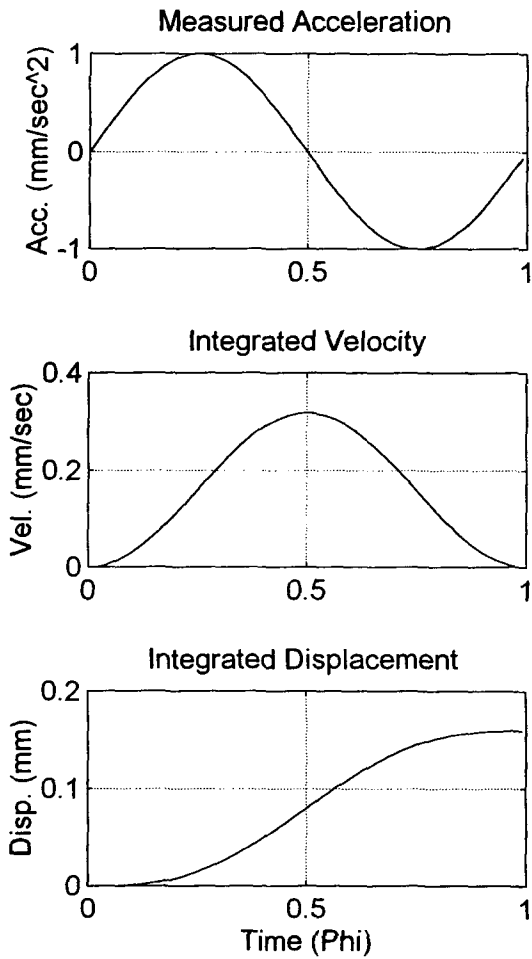
가속도 기록으로부터 속도나 변위를 구하려면 가속도 기록을 순차적으로 적분해야 한다. 이때 적분을 시간영역에서 하게 되면 <그림 3>에서 보는 바와 같이 실제 거동과 판이한 결과를 얻게 된다.

따라서, 주기적인 신호가 반복되는 가속도 기록은 진동수 영역에서 적분을 해야 원하는 속도나 변위기록을 <그림 4>와 같이 구할 수 있다.

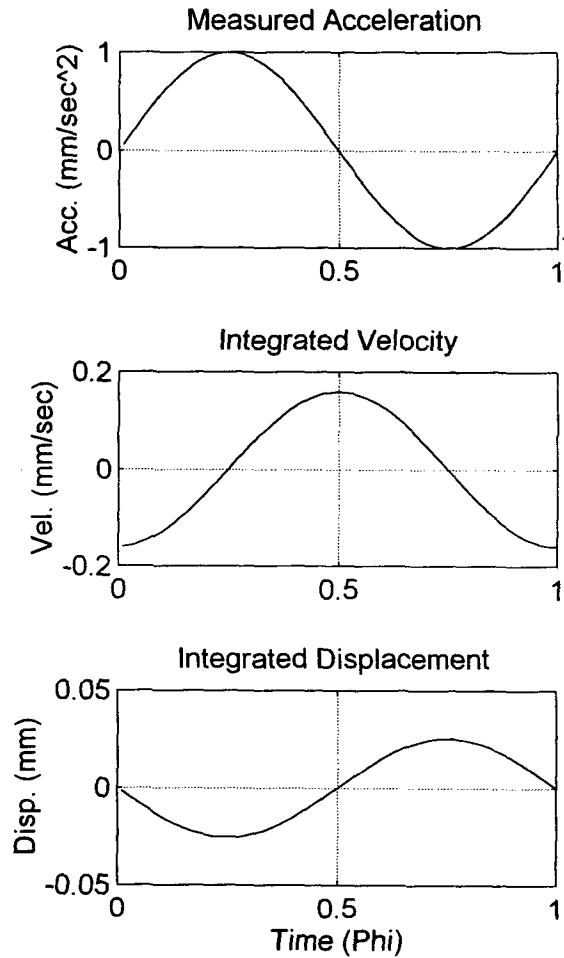
#### 4.5. 표본화 주파수의 결정

본 논문의 고찰에서 알 수 있듯이 신호처리에 있어서 표본화 주파수의 선정은 무엇보다도 중요하다. 동적 실험에서는 대상구조물의 고유진동수를 정확하게 알 수 없으므로, 나이퀴스트 주파수를 정할 수 없다. 따라서, 본 연구에서는 해석적으로 구하거나 통계적인 경험으로부터 도출된 고유 진동수에 따라 제 1 모드 고유진동수의 네 배에 해당하는 표본화 진동수로서 신호 기록으로부터 표본을 추출한다. 나이퀴스트 진동수의 5%에 상당하는 상하한 진동수 대역을 진동수 영역에서 필터링하고, 스펙트럼 분석을 통해 고유 진동수를 도출하여 잡음이 아닌 동적거동 신호라고 판단되는 진동수가 모두 분석에 참여하도록 반복적으로 계산한다.

표본추출 진동수가 결정되면 가속도 기록을 적분하여 계측된 변위기록과 비교분석하여 이것이 일치하는 지를 판단하며, 이것이 일치하면 그 진동수를 구조물에 대한 표본추출 진동수로 결정하여 여타 지점의 분석을 위한 기본자료로 삼는다. 즉, 기준점에서 정확한 데이터에 의해 표본추출 진동수와 필터링을 위한 잡음의 성분을 결정하고 이를 다른 부분의 가속도 기록을 처리하기 위한 기본 데이터로 활용함으로써 교량의 동적 특성을 적절하게 추출할 수 있다.



<그림 3> 시간 영역에서의 적분



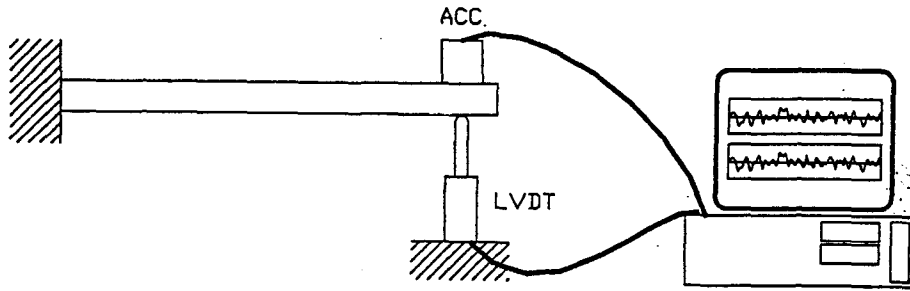
<그림 4> 주파수 영역에서의 적분

## 5. 시험 시편의 계측 및 분석

### 5.1. 계측의 개요

시험시편으로서 각형 강봉을 시험대에 캔틸레버로 고정하였으며, 자유진동과 충격에 대해 각각 실험하였다. 계측기기로서 가속도계와 LVDT를 캔틸레버 단부의 같은 위치에 장치하여 변위와 가속도를 실측하고, 가속도 기록으로부터 이중적분하여 구한 변위를 실측변위와 정량적으로 비교할 수 있도록 하였다.

시험의 개요는 <그림 5>와 같으며, 가속도 기록과 변위 기록을 각각 10Hz, 20Hz, 30Hz, 40Hz, 50Hz, 75Hz, 100Hz의 진동수로 표본추출하여 이산화하였다.



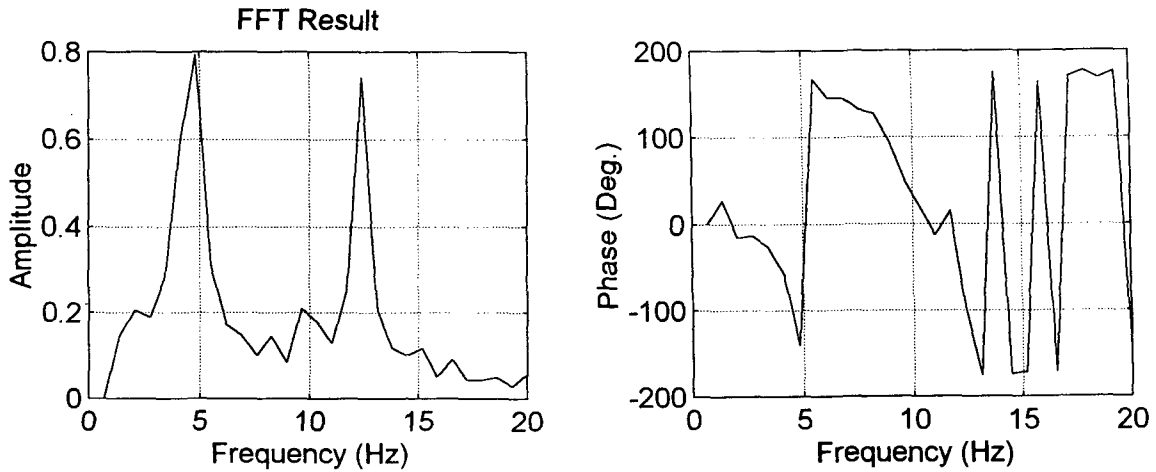
<그림 5> 시험의 개요

### 5.2. 계측 데이터의 분석

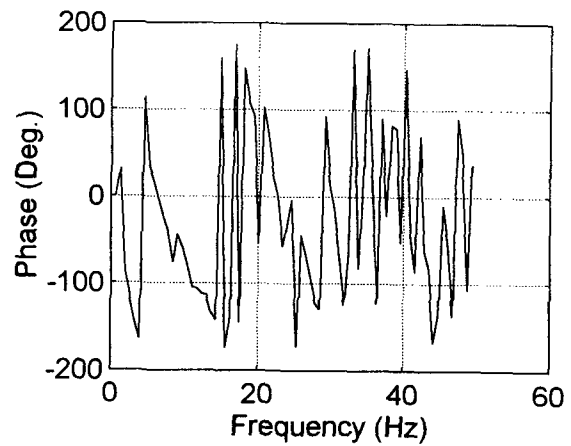
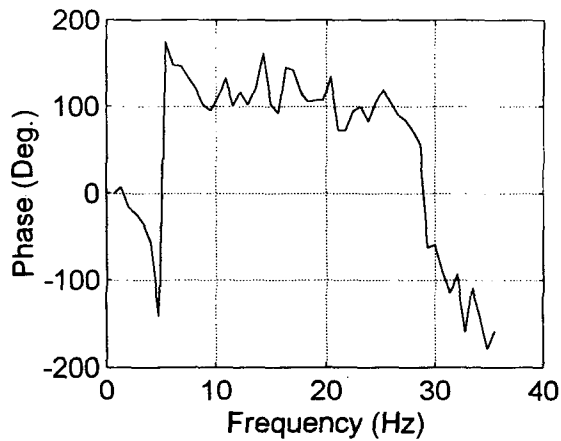
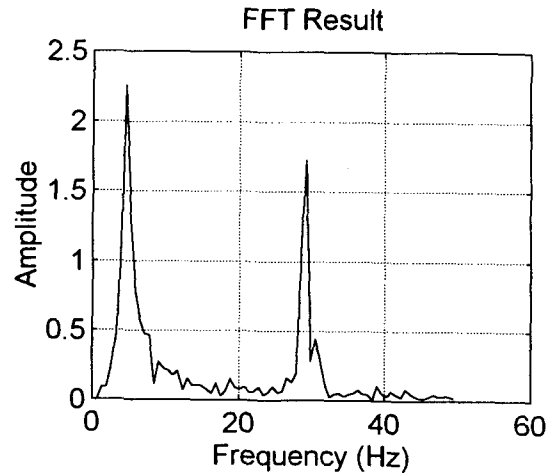
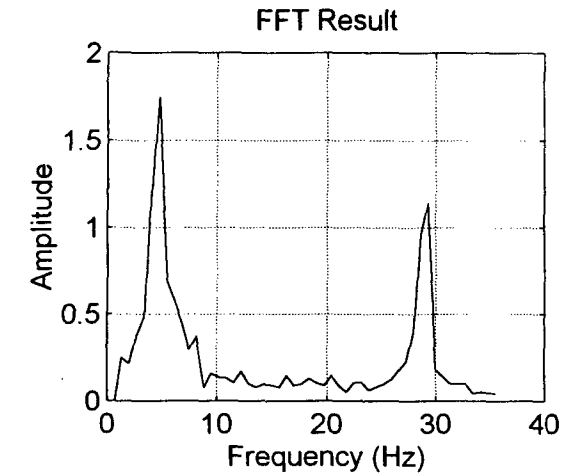
계측한 가속도 기록에 대해 고유진동수를 구하기 위해 우선 FFT분석을 통해 진폭의 스펙트럼과 위상각의 변화를 도식한다. 예로서 40Hz, 75 Hz, 100 Hz의 진동수로 표본추출하여 이산화된 데이터에 관한 분석결과를 각각 <그림6>, <그림 7>, 및 <그림 8>에 도식한다.

<그림 6>과 <그림 7>을 비교분석해 보면, <그림 6>에서는 표본추출 진동수가 40 Hz이므로 분석대상인 고유진동수의 최대값이 20 Hz이어서 <그림 7>에서 위상각의 180도 변화와 함께 명확하게 나타나는 2차 모드에 관한 진폭의 정점이 천이하는 것을 확인할 수 있다.

<그림 7>과 <그림 8>을 비교분석해 보면, <그림 8>에서는 표본추출 진동수가 100 Hz이므로 분석대상인 고유진동수의 최대값이 50 Hz이나, 1차와 2차 모드에 대한 정점이 동일한 진동수에서 나타나고 2차모드 이상의 성분들은 잡음인 것을 위상각의 도시로부터 알 수 있다. 따라서, 본 실험을 위한 표본추출 진동수는 75 Hz가 적정한 것으로 판단할 수 있다.



<그림 6> 표본추출 진동수가 40Hz인 경우



<그림 7> 표본추출 진동수가 75 Hz인 경우

<그림 8> 표본추출 진동수가 100Hz인 경우

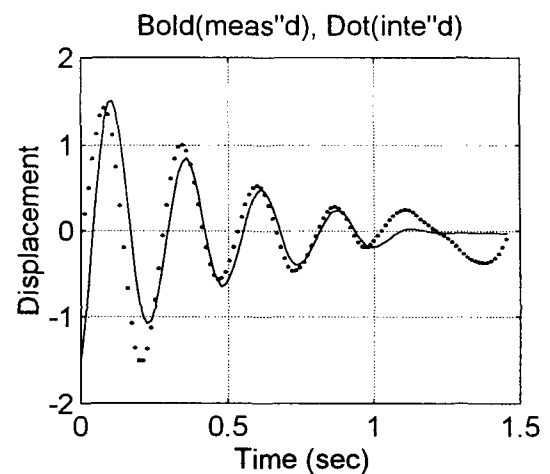
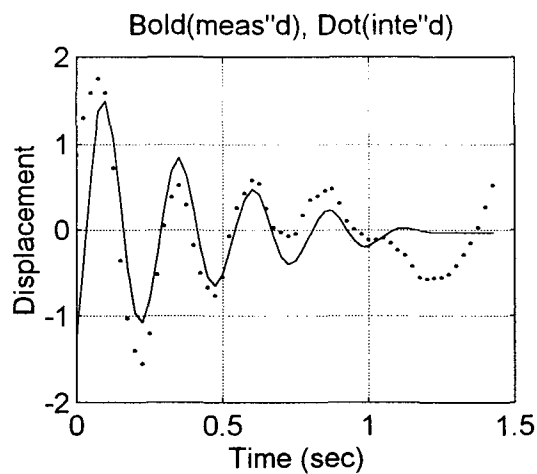
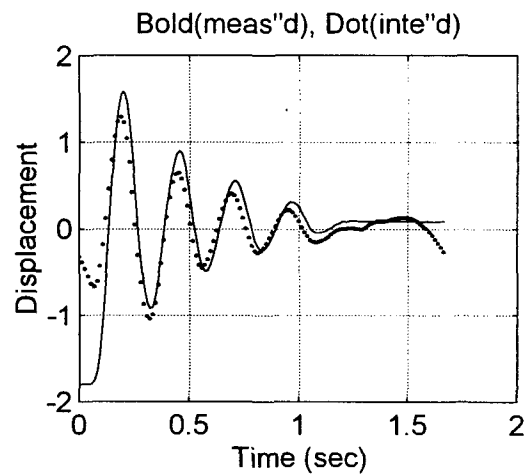
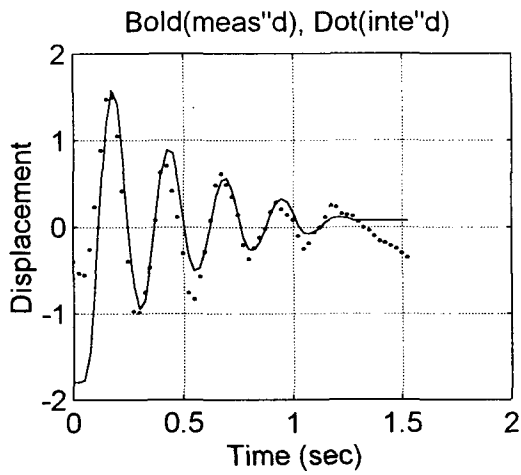
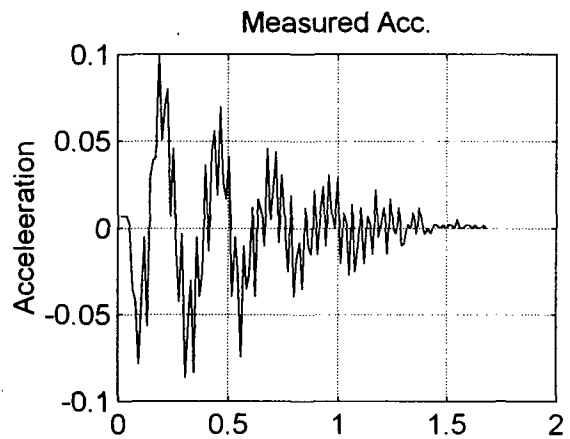
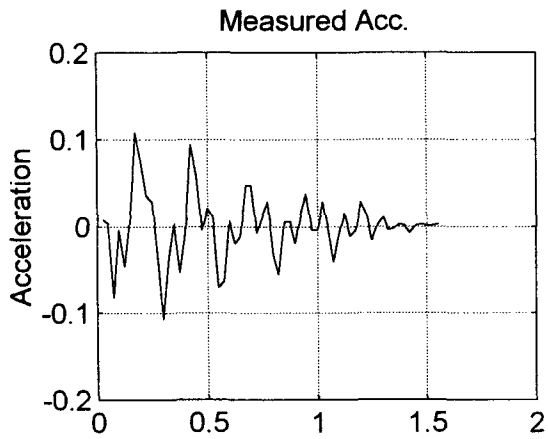
### 5.3. 변위의 계산

계측된 가속도를 진동수 영역에서 이중적분하여 변위를 계산하였다. 가속도계와 변위계를 캔틸레버 시편의 단부에 설치하고 계측하였으므로, 2 차모우드에 관한 성분은 진동수 영역의 필터로서 필터링하여 제거하였다. 또한, 동일한 필터와 이득값을 충격시험과 자유진동 시험에 적용하여 40 Hz의 경우를 <그림 9>에 보이고 75 Hz의 경우를 <그림 10>에 도시한다.

그림에서 판단할 수 있듯이 실측변위와 가속도로부터 구한 변위는 적절하게 일치하고 있으며, 40 Hz의 경우는 표본추출 진동수가 부적절한 관계로 불충분한 결과를 보여줌을 알 수 있다. 따라서, 표본추출 진동수가 적절하지 못하면 각 모우드에 따른 진동수를 정확하게 구할 수 없을 뿐 아니라, 수치적분된 결과들도 왜곡됨을 확인할 수 있다.

가속도 기록을 적분하여 변위를 구할 경우, 초기변위에서 실제변위와 편차가 발생한다. 이는 가속도기록의 전 구간을 하나의 주기로 고려하는 진동수 영역 적분의 특성에 기인하는 것으로 사료된다. 따라서, 충격이나 단시간에 재하되는 동적하중에 대해서는 별도의 고려가 따라야 할 것이다. 그러나, 정상 교통하중이나 바람, 등에 의한 교량의 진동에 대해서는 본 연구결과가 충분히 적용될 수 있을 것이다.





<그림 9> 실측변위와 계산된 변위의 비교  
(표본추출 진동수가 40 Hz인 경우)

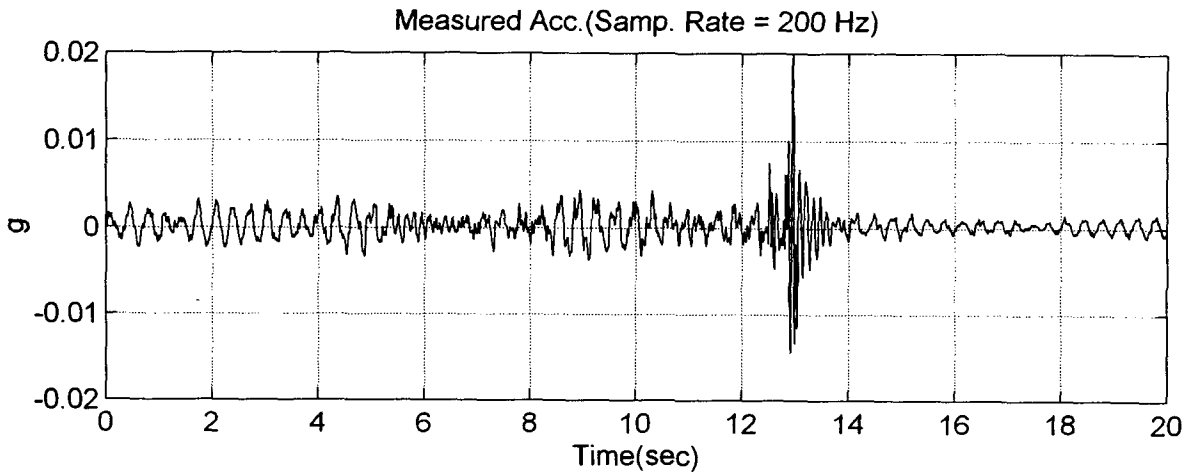
<그림 10> 실측변위와 계산된 변위의 비교  
(표본추출 진동수가 75 Hz인 경우)

## 6. 실제 교량에서의 적용예

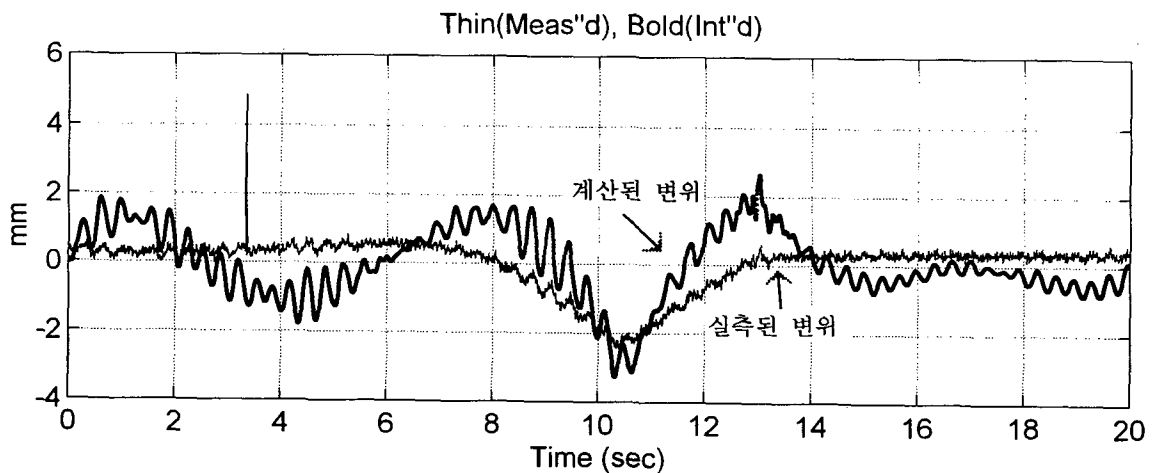
본 연구결과가 적용된 교량은 1995년 6월에 일부 개통된 강변 도시 고속도로 구간으로서 국내 최초로 시공된 프리캐스트 세그멘탈교의 공용전 안전성 시험을 위해 정적 및 동적 시험에 시행되었다.<sup>19)</sup>

동적 재하시험을 위해 콘크리트 변형계이지 18 개, 변위계 7 개, 가속도계 27 개를 설치하였는 바, 본 연구에서 대상으로 한 것은 교량의 편측 날개부의 동일 위치에 가속도계와 변위계를 설치하여 가속도와 변위를 각각 계측하고 <그림 11>에 보이는 실측 가속도를 진동수 영역에서 이중 적분하여 구한 변위를 실측변위와 <그림 12>과 같이 비교하였다.

가속도 기록으로부터 구한 변위와 실측한 변위는 비교적 잘 일치 하였다. 따라서, 본 연구결과를 실제교량의 계측에 이용하는 경우, 기준점의 변위와 가속도만을 계측하여 기준 데이터로 삼고, 나머지 지점의 변위는 가속도를 손쉽게 계측하여 이를 수치적분하여 변위를 구한다면 변위계측에 드는 비용과 인력을 대폭 절감할 수 있을 것이다. 특히, 특수교량이나 협곡이나 수심이 깊은 위치에 가설된 교량들과 같이 고정점을 설치하기 곤란한 경우 본 연구의 결과가 유용하게 사용될 수 있다.



<그림 11> 실측된 가속도 기록



<그림 12> 실측된 변위 및 계산된 변위

## 7. 결론

기본적인 정현파 신호에 대하여 도식적인 고찰과 적분 및 진동수 추출을 통해 표본추출 주기에 따른 신호를 적절하게 분석할 수 있는 방법을 설정하고, 이를 실험실 내의 시편에서 실측된 가속도와 실제교량에서 계측된 가속도 기록에 적용함으로써 다음의 결론을 얻을 수 있었다.

1. 고주파 성분의 진동에서는 나이퀴스트 진동수로 표본을 추출했을 경우에는 원래 진동형과 유사한 진동파형을 재현하였으나, 나이퀴스트 진동수의 1.5배 이상의 진동수로 표본을 추출해야 원래 진동파형과 거의 유사한 파형을 재현할 수 있었다.
2. 저주파 성분을 갖는 진동에서는 공학적으로 의미있는 적분된 값을 구하려면 고유진동수의 6배 이상의 진동수로 표본을 추출해야 한다.
3. 시편에 충격을 가한 경우와 자유진동시킨 경우에 대해 진폭과 위상의 스펙트럼을 구하고 이를 분석하여, 각각의 모드에 대한 고유진동수를 구할 수 있었다.
4. 가속도 데이터를 계측하고 이를 진동수 영역에서 적분하여 변위를 구할 수 있었으며, 이 값은 변위계로 실측된 변위와 잘 일치하였다.
5. 본 연구의 결과를 현장계측에 적용할 경우 변위계를 고정시킬 수 없어서 변위계측이 불가능할 경우 용이하고 저렴한 비용으로 설치할 수 있는 가속도계를 통한 가속도를 계측하여 이를 수치적분함으로써 동적인 변위를 계측할 수 있다.
6. 적절한 표본추출 주기는 구조물의 동적인 특성에 따른 고유주기에 따라 달라지므로 사전의 해석적인 방법이나 경험적으로 표본추출 진동수의 상한선을 적절하게 결정해야 한다.

## 참고문헌

1. Patrick Paultre, Jean Proulx and Martin Talbot, "Dyanmic Testing Procedures for Highway Bridges using Traffic Loads.", J. of Struct. Eng., 121(2), Feb., 1995, 362-376.
2. John Dunicliff and Gordon E. Green, "Geotechnical Instrumentation for Monitoring Field Performance", John Wiley & Sons, Inc., 1993.
3. Daniel J. Inman, "Engineering Vibration", Prentice Hall, Inc., 1994.
4. Julius S. Bendat, Allan G. Piersol, "Engineering Applications of Correlation and Spectral Analysis", John Wiley & Sons, 1980.1.
5. Robert D. Strum and Donald E. Kirk, "Comtemporary Linear Systems using MATLAB", PWS Publishing Company, 1994.
6. 박창호, 이동근, "주파수 영역에서의 가속도 기록 보정", 대한토목학회 논문집, 제12권 제4호, 1992년 12월, pp. 71-79.
7. D. J. Ewins, "Modal Testing: Theory and Practice", Research Studies Press Ltd., England, 1986.
8. Julius S. Bendat and Allan G. Piersol, "Random Data analysis and measurement procedures", John Wiley & Sons, Inc., 1986.
9. 이성우, 배두병 외, "강변도시고속도로 PRECAST SEGMENTAL 교량의 하중재하 시험에 관한 연구", 국민대학교 구조안전연구소 연구보고서 KMU/SSRC-95/6, 1995.8.