

## 주파수영역에서의 가속도 기록 보정

## Correction of Accelerogram in Frequency Domain

박창호\* · 이동근\*\*

Park, Chang Ho · Lee, Dong Guen

## Abstract

In general, the accelerogram of earthquake ground motion or the accelerogram obtained from dynamic tests contain various errors. In these errors of the accelerograms, there are instrumental errors(magnitude and phase distortion) due to the response characteristics of accelerometer and the digitizing error concentrated in low and high frequency components and random errors. Then, these errors may be detrimental to the results of data processing and dynamic analysis. An efficient method which can correct the errors of the accelerogram is proposed in this study. The correction of errors can be accomplished through four steps as follows ; 1) using an interpolation method a data form appropriate to the error correction is prepared, 2) low and high frequency errors of the accelerogram are removed by band-pass filter between prescribed frequency limits, 3) instrumental errors are corrected using dynamic equilibrium equation of the accelerometer, 4) velocity and displacement are obtained by integrating corrected accelerogram.

Presently, infinite impulse response(IIR) filter and finite impulse response (FIR) filter are generally used as band-pass filter. In the proposed error correction procedure, the deficiencies of FIR filter and IIR filter are reduced and, using the properties of the differentiation and the integration of Fourier transform, the accuracy of instrument correction and integration is improved.

## 요 지

지진에 관한 지반가속도 기록이나 동적실험에서 측정된 가속도 기록에는, 가속도계의 응답특성, A/D변환기의 성능 및 수치화 과정, 그리고 기록계의 특성 등으로 여러가지 오차가 포함된다. 이들 오차들은 데이터 해석이나 동적해석시 왜곡된 결과를 유발시킨다. 본 연구에서는 가속도 기록에 포함된 오차를 효율적으로 보정하는 방법을 제안하였다. 제안된 오차보정방법은 다음과 같이 4단계로 나뉘어 진행된다 ; 1) 보간법을 이용하여 보정에 적절한 데이터를 만든다, 2) 저주파와 고주파 성분이 주를 이루는 수치화 오차를 band-pass필터를 이용하여 제거한다, 3) 가속도계의 특성으로 인한 오차들을 보정한다, 4) 보정된 기록을 적분하여 속도와 변위를 얻는다.

현재 band-pass 필터로는 FIR필터나 IIR필터가 주로 이용되고 있는 데 초기데이터의 왜곡, 위상의 변화, 계산량의 과다와 같은 문제점들을 가지고 있다. 제안된 오차보정방법은 이들 필터의 여러 문제점을

\* 정회원 · 한국과학기술원 토목공학과 박사과정

\*\* 정회원 · 한국과학기술원 토목공학과 부교수

개선하였으며, Fourier 변환의 특성을 이용하여 미분과 적분을 수행함으로써 가속도계의 특성으로 인한 오차의 보정과 속도 및 변위 계산의 정확성을 높였다.

## 1. 서 론

지진이나 기타 동적 실험에서 가속도계(accelerometer)에 의해 얻어진 가속도 데이터들은 여러가지 계측오차를 포함하게 되는데, 이런 오차들을 포함하고 있는 데이터를 입력으로 동적 해석을 수행한다면 크게 잘못된 결과가 나타날 수 있다. 그러므로 이 오차들은 보정을 통해 제거되어야 하며, 효율적인 오차 보정(error correction)을 위한 연구가 필요하게 된다.

이 오차는 가속도계에 의한 진폭과 위상에 대한 왜곡, 수치화(digitization) 과정에서의 오차 및 랜덤 오차<sup>(4,5)</sup> 등 여러가지 원인에 의해 발생하는 데, 보통 저주파와 고주파 성분이 주를 이루며, 이 오차는 가속도계의 특성과 원리, 수치화 과정과 그 기계적 특성 등을 알면 어느정도 보정될 수 있다.<sup>(7,9)</sup>

따라서 본 연구에서는 보다 정확한 데이터를 얻기 위해 기존의 오차 보정 방법의 특성을 이해하고 그 단점을 보완할 수 있는 보다 효율적인 오차 보정 방법을 찾는것을 목적으로 한다. 또한 가속도 데이터를 수치적분하여 속도와 변위에 대한 시간이력을 얻고, 가속도 데이터에 포함된 오차가 수치적분 결과 얻어지는 속도와 변위에 어떤 영향을 미치는지에 대한 연구를 수행한다.<sup>(6,11)</sup>

가속도 기록은 먼저 보간법에 의해 보정에 적절한 시간간격으로 만들고, 수치화 과정에서 발생하는 오차를 band-pass 필터에 의해 보정한다. 가속도계의 응답 특성때문에 발생하는 진폭(magnitude)과 위상(phase)의 왜곡은 가속도계의 동적평형 방정식을 이용하여 보정한다. 끝으로 수치적분을 이용하여 속도와 변위의 시간이력을 얻는다.

Finite-impulse response(FIR) 필터나 infinite-impulse response(IIR) 필터는 위상의 왜곡, 안전성, 초기데이터의 왜곡 및 계산량의 과다와 같은 문제점들을 가진다.<sup>(9,10)</sup> 본 연구에서는 앞에서 열거한 문제점들을 해결하면서 계산량을 줄일 수 있는, 일련의 오차보정과정을 주파수 영역에서 수행하는,

주파수영역에서의 오차보정방법을 제안한다.

## 2. 가속도 기록에 포함된 오차

### 2.1 가속도계에 의한 진폭과 위상의 왜곡

지진계와 같이 저주파수 성분을 기록하기 위한 기기에는 주로 단자유도계로 설계된 스트레인계이 지형 가속도계가 이용된다(그림 1). 이 가속도계의 운동방정식은 다음과 같다.

$$m\ddot{x} + c\dot{x} + kx = -m\ddot{x}_g \quad (1)$$

여기서  $m$ 은 질량,  $c$ 는 감쇠,  $k$ 는 스프링 강성이다. 식 (1)로부터 위상차  $\Phi$ (phase lag)와 응답계수  $D$ (magnification factor)를 구하면 다음과 같다.

$$\phi = \tan^{-1}\left(\frac{\sqrt{2\xi\beta}}{1-\beta^2}\right), D = \frac{1}{\sqrt{(1-\beta^2)^2 + (2\xi\beta)^2}} \quad (2)$$

식 (2)로부터 고주파 입력 가속도에 대해서 파의 위상과 진폭이 왜곡됨을 알 수 있다(그림 2).

### 2.2 기록장치(recording system)에 의한 오차

기록 장치에 의한 오차는 기록장치나 기록의 시간에 따라 차이가 생기는 경우가 많다. 이 오차는 주로 기록 용지의 한쪽 방향으로 편향된 기록을 낳는데, 보통 이 오차는 가속도 기록으로부터 속도나 변위 계산시 많은 영향을 준다.<sup>(5)</sup>

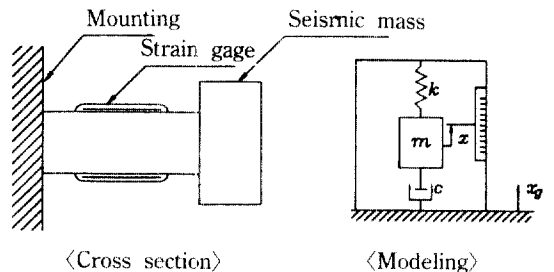
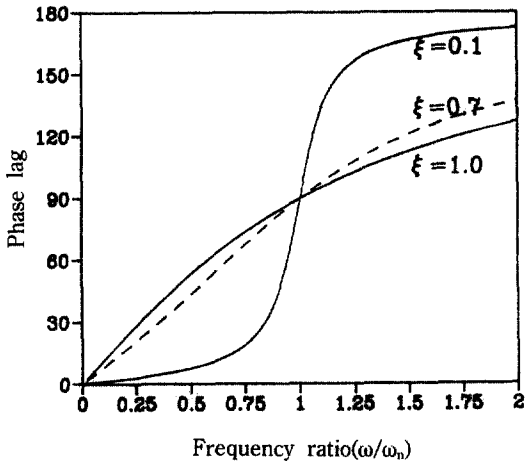
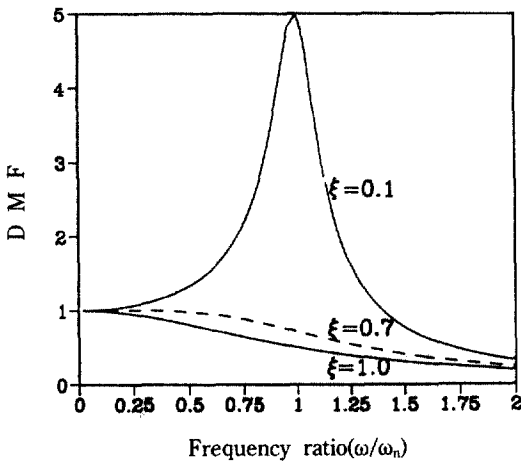


그림 1. 스트레인 게이지형 가속도계의 단면도



(a) Phase lag



(b) Dynamic magnification

그림 2. 스트레인 게이지형 가속도계의 응답 특성

### 2.3 수치화 과정에서 발생하는 오차

수치화 과정에서 발생하는 오차는 크게 두가지로 나눌 수 있다. 하나는 A/D 변환기에 의해 생기는 주기적인 오차(systematic error)로서 장주기 성분이 주를 이룬다. 다른 하나는 기계의 특성에 관계없이 발생하는 랜덤 오차이다. Trifunac의 연구<sup>(6)</sup>에 의하면 이 랜덤 오차는 Gaussian 분포를 가지며 저주파에서 큰 값을 나타낸다.

또한 수치화 과정에서 단위 시간당의 디지털 데이터의 갯수에 따라 표현할 수 있는 고주파 성분의 한계가 결정되므로 데이터의 동적 성질, 가속도계의

특징 등에 따라 데이터 취득속도(sampling rate)의 신중한 결정이 요구된다. 즉 샘플링 비율을 크게 하면 보다 큰 고주파 성분을 포함하고 저주파 성분의 오차가 적게 포함된 데이터를 얻을 수 있다.<sup>(5,11)</sup> 아날로그 신호로 기록된 선 두께도 디지털 형태의 기록의 정확성에 영향을 주는 많은 요인 중의 하나이다. 이는 아날로그 기록을 디지털 형태로 바꿀때 선 두께에 따라 수치화 과정에 발생하는 오차가 크게 변하기 때문이다. 즉 선의 중심을 따라 수치화 하는 데에는 정확한 조작이 어렵기 때문에 선이 두꺼울 수록 오차는 커진다.<sup>(6)</sup>

## 3. 가속도 기록의 오차 보정

### 3.1 보간법에 의한 데이터의 준비

디지털 형태의 가속도 기록을 보정하기 위해서는 데이터의 특성이나 보정 방법에 따라서 적절한 데이터의 준비가 필요하다. 정확한 보정이나 동적 해석을 위해 시간 간격을 줄여 데이터의 주파수 한계를 확장하거나, 데이터의 누락으로 인해 데이터의 보간이 필요한 경우가 있다. 또 같은 시간 간격으로 수치화 하지 않은 경우 같은 시간 간격의 데이터를 만들어야 한다. 그러므로 실제 실험 구조물이나 지진의 운동을 보다 잘 표현할 수 있는 보간법이 필요하게 된다. 본 연구에서는 각각의 보간점을 매끄러운 곡선으로 연결하면서, 각 보간점에서 앞, 뒤의 곡선의 일차 및 이차 미분이 연속이 되는 3차 함수로 보간하는 3차 spline 보간법(cubic spline interpolation)을 사용한다.<sup>(9)</sup> S(t)를 3차 spline 보간함수라 하면 S(t)는 두 인접한 보간점을 지나는 3차 곡선이며, 인접한 곡선들은 각 보간점에서 일차 및 이차 미분에 대해 연속이다. Spline 함수 S(t)는 다음식과 같이 나타낼 수 있다.

$$S(t) = A + B(t - t_k) + C(t - t_k)^2 + D(t - t_k)^3 \quad (3)$$

식 (3)에서 계수 A, B, C, D는 spline함수의 성질로부터 다음과 같이 구할 수 있다.

$$A_k = y_k, \quad B_k = d_k - \frac{h_k(2\sigma_k + \sigma_{k+1})}{6}$$

$$C_k = \frac{\sigma_k}{2}, \quad D_k = \frac{\sigma_{k+1} - \sigma_k}{6\sigma_k} \quad (4)$$

여기서  $\begin{cases} \sigma_k = \ddot{S}(t_k), \sigma_{k+1} = \ddot{S}(t_{k+1}) \\ h_k = t_{k+1} - t_k \end{cases}$  이다.

### 3.2 진폭과 위상차의 왜곡에 대한 보정

가속도계의 동적 평형 방정식인 식(1)의 양변을 질량  $m$ 으로 나누고 정리하면

$$\ddot{x}(t) + 2\xi\omega_n\dot{x}(t) + \omega_n^2x(t) = -a(t) \quad (5)$$

이 되고, 여기서  $a(t)$ 는 지반 가속도이다.

그런데 우리가 얻는 데이터는 입력가속도  $a(t)$ 에 근사적으로 비례한 값인  $x(t)$ 이다. 식 (5)의 좌측의 두항은 저주파 성분의 가속도에 대해서는 아주 작은 값으로 무시할 수 있으나, 고주파 성분의 경우에는 진폭과 위상을 왜곡시킨다. 그러므로 보다 정확한 데이터를 얻기 위해서는 식 (5)의 좌측 두항을 고려해야만 한다. 식 (5)를 이용하여 입력가속도  $a(t)$ 를 역으로 구하면 다음과 같다.<sup>(6,11)</sup>

$$a(t) = -\ddot{x}(t) - 2\xi\omega_n\dot{x}(t) - \omega_n^2x(t) \quad (6)$$

식 (6)을 이용하여 진폭과 위상에 대한 왜곡을 보정할 수 있으며, 데이터의 일차와 이차 미분은 Fourier transform의 성질을 이용하여 다음과 같이 주파수 영역에서 보정한다.

$$A(\omega) = \{\omega^2 - 2\xi\omega_n(i\omega) - \omega_n^2\}X(\omega) \quad (7)$$

여기서  $A(\omega)$ 와  $X(\omega)$ 는  $a(t)$ 와  $x(t)$ 의 Fourier transform이다.

식 (7)을 이용하여 디지털 형태의 데이터에서 진폭과 위상차의 왜곡을 보정할 수 있다.

### 3.3 Band-pass 필터링에 의한 저주파와 고주파 성분의 오차 보정

#### 3.3.1 Band-pass 필터의 주파수한계 결정

일반적으로, 가속도 기록에는 여러가지의 오차들이 포함되어 있고, 이들 오차의 대부분은 저주파와 고주파 성분의 기록에 집중되어 있다. 따라서 오차의 보정은 오차가 포함된 저주파와 고주파의 한계를 결정하여, 이 한계 이상의 주파수 성분을 제거함으로써 이루어진다.<sup>(1)</sup> 즉, 그림 3과 같은 주파수 특성을 가지는 band-pass 필터를 이용하여 오차를 제거한다.

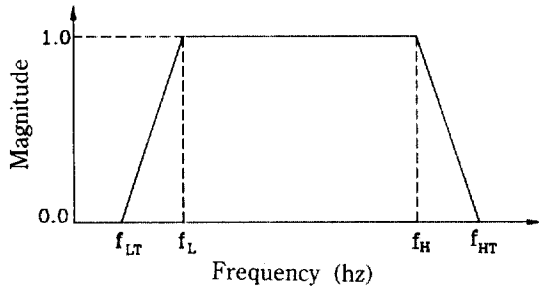


그림 3. Band-pass 필터의 주파수 특성

필터링할 주파수의 한계를 결정하는 데는 지반 가속도의 주파수 특성, 기록의 시간 간격, 가속도계의 고유진동수, 필터의 특성 등을 고려하여 오차를 제거하면서 기록의 특성을 변화시키지 않는 범위내에서 주파수의 한계를 결정하여야 한다.<sup>(6,11)</sup> 고주파의 한계는 이들 데이터를 이용한 해석이나 일반 동적 해석시 관심을 가지는 주파수 한계와 보정후 얻을 데이터의 Nyquist 주파수 가운데 작은 값으로 결정하고, 저주파의 한계는 가속도의 시간이력곡선과 적분결과 얻어진 속도와 변위의 시간이력곡선의 성분변화를 보며 적절한 한계를 구한다.

#### 3.3.2 주파수 영역에서 band-pass 필터링

디지털 필터는 일련의 입력 데이터  $\{x(n)\}$ 로부터 보다 적절한 성질을 가지는 데이터  $\{y(n)\}$ 로 변환시키는 알고리즘으로 정의된다. 일반적인 디지털 필터링의 시간 영역에서의 원리는 아래와 같은 입력과 출력의 선형 조합으로 나타낼 수 있다.

$$y(n) = \sum_{k=1}^M a_k y(n-k) + \sum_{k=0}^N b_k x(n-k) \quad (8)$$

즉, 출력  $y(n)$ 은  $y(n-1)$ 에서  $y(n-M)$ 까지의 출력값들이 계수  $a_k$ 에 의해 곱해진 값들의 합과  $x(n)$ 에서  $x(n-N)$ 까지의 입력값들이 계수  $b_k$ 에 의해 곱해진 값들의 합으로 표현된다. 이와 같은 필터를 infinite-impulse response(IIR) 필터라 하며, 이는 하나의 입력값에 대해 출력값이 무한히 계속된다는 의미의 필터이다. 식 (8)에서  $a_k$ 의 모든 값이 0일 경우 출력값은 현재와 과거의 입력값에만 영향을 받는다. 이와 같은 필터를 finite-impulse response(FIR) 필터라고 하며, 이 경우에 하나의 입력값에 대해 출력값은 필터 차수만큼 존재한다.

식 (8)의 필터의 양변에 Z-변환(Z-transform)을 취한 후 전달함수(transfer function) H(z)를 구하면 다음식과 같다.

$$H(z) = \frac{\sum_{k=0}^N b_k z^{-k}}{1 - \sum_{k=1}^M a_k z^{-k}} \quad (9)$$

실제 디지털 필터의 특성은 이 전달함수 H(z)에 의해 결정된다.<sup>(9)</sup> 다시 말해서 필터의 설계는 이 전달함수를 결정함으로써 이루어진다고 볼 수 있다. 전달함수의 주파수 특성은 다음과 같다.

$$H(e^{i\omega}) = \frac{\sum_{k=0}^N b_k e^{-i\omega k}}{1 - \sum_{k=1}^M a_k e^{-i\omega k}} \quad (9)$$

본 연구에서 필요로 하는 필터는 저주파와 고주파의 오차 성분을 제거하면서 그 사이의 주파수 성분은 변함이 없어야 하며, 위상을 왜곡시키지 않고, 또 입력의 초기 데이터의 왜곡이 없어야 한다. 또한 필터링의 시간 영역에서의 감도(sensitivity)가 작아야 한다.

Band-pass 필터를 설계함에 있어서 현재 사용하고 있는 IIR 필터나 FIR 필터는 여러가지 문제점을 가지고 있다. IIR 필터의 경우에는 계산량이 적은 장점이 있으나 위상차가 비선형이어서, 이 문제를 없애기 위하여 all-pass 필터가 필요하며, FIR 필터의 경우에는 위상차를 선형으로 설계할 수는 있으나, 보통 필터의 차수가 커서 계산량이 매우 많아지는 단점이 있다. 또 두가지 형태 모두 초기 데이터의 왜곡을 피할 수가 없다.

따라서 본 연구에서는 주파수 영역에서의 필터링을 제안한다. 주파수 영역에서의 필터링은 시간 영역에서의 필터링과는 달리 fast Fourier transform (FFT)과 inverse fast Fourier transform (IFFT)의 알고리즘이 추가적으로 필요하다. 여기서는 대칭 Cooley-Tukey 알고리즘과 Brigham의 공식<sup>(2,10)</sup>을 사용한다. 이 필터링 과정은 입력 데이터를 FFT 알고리즘을 통해 주파수 영역으로 변환시킨 다음, 필터링시 필요로 하는 특성을 가지는 필터의 성분을 구한 후, 이 필터 성분을 각각 데이터의 주파수 성

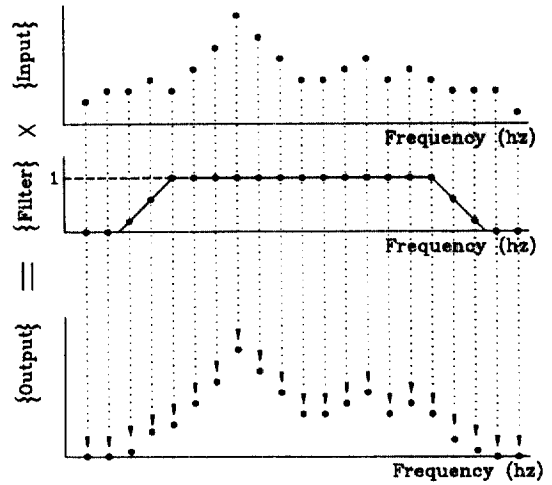


그림 4. 주파수 영역에서의 필터링 원리

분에 곱한다. 이때 필터의 위상이 영이므로 위상차는 발생하지 않는다. 이 과정이 끝나면 IFFT 알고리즘을 통해 시간 영역으로 변환시킨다. 여기서 얻어진 결과가 우리가 원하는 주파수 특성을 가지는 데이터의 시간이력이 될 것이다. 이 결과의 특성은 입력의 초기 데이터의 왜곡이 없다는 것이다. 이 필터의 주파수 영역에서의 곱셈 과정을 그림 4에 나타내었다.

### 3.4 속도와 변위의 계산

속도와 변위는 보정된 가속도 기록을 적분함으로써 얻을 수 있다. 그러나 디지털 형태의 데이터는 해석적으로 적분을 할 수 없으므로 수치적 방법에 의한 적분을 한다. 보정된 가속도 기록을 Fourier transform의 성질을 이용하여 적분한다.

v(t)와 d(t)를 가속도 a(t)를 적분하여 얻은 속도와 변위라고 하면

$$v(t) = \int_0^t a(t) dt \quad (11)$$

$$d(t) = \int_0^t v(t) dt \quad (12)$$

이고, 식 (11)과 (12)의 양변에 Fourier transform을 취하면

$$V(\omega) = \frac{A(\omega)}{i\omega} \quad (13)$$

$$D(\omega) = \frac{V(\omega)}{i\omega} = \frac{A(\omega)}{-\omega^2} \quad (14)$$

이다. 여기서  $A(\omega)$ ,  $V(\omega)$ ,  $D(\omega)$  는  $a(t)$ ,  $v(t)$ ,  $d(t)$ 의 Fourier transform이다.

주파수 영역에서의 적분은, 먼저 보정된 가속도 기록을 주파수 영역으로 변환시킨 다음, 식 (13)과 (14)에서와 같이 속도와 변위의 주파수 성분을 구한 후, 결과를 시간 영역으로 변환시켜 속도와 변위의 시간이력을 구한다.

식 (13)과 (14)를 살펴보면 적분의 과정에서 위상과 진폭이 변함을 알 수 있다. 속도의 경우 가속도에 비해 위상이  $\pi$ 만큼 변하며, 진폭은 고주파 성분일수록 작아진다. 변위의 경우에는 가속도와 위상은 같으나, 고주파 성분의 진폭은 더욱 작아진다. 이와 같은 주파수 영역에서의 적분은 FFT 알고리즘의 발달로 매우 효과적으로 속도와 변위를 얻게 하며, 적분이 진폭과 위상에 어떤 영향을 미치는지를 쉽게 알 수 있게 한다.

일반적으로 적분은 고주파 성분보다는 저주파 성분의 영향을 크게 받으므로, 저주파 성분의 오차가 포함된 가속도 기록을 적분하여 속도와 변위를 구할 경우 지진이나 동적 실험으로 인한 지반이나 구조물의 거동과는 다른 결과를 초래할 것이다. 그러므로 앞에서 언급한 저주파 성분의 오차 보정에 따라 적분의 결과 얻어지는 속도와 변위의 특성은 크게 변한다. 결국 가속도 기록의 오차 보정이 정확할수록 정확한 속도와 변위를 얻을 수 있다.

### 3.5 가속도 기록의 보정 절차

디지털 신호로 기록된 가속도 기록은 2장에서 언급한 바와 같이 여러가지 오차들이 포함되어 있으므로 오차의 보정을 통해 지진이나 동적 실험의 특성을 보다 잘 표현할 수 있는 데이터를 얻어야 한다. 이 오차들의 보정은 아래와 같은 단계를 통해 행해진다.

- 단계 I : 보정을 수행하기 위하여 필요한 시간 간격의 데이터를 만든다. 3차 spline 보간법을 사용해서 등간격의 데이터를 만든다.
- 단계 II : FFT 알고리즘을 통하여 데이터를 주파수 영역으로 변환시킨다. 여기서 FFT와 IFFT 알고리즘의 정확도(resolution)를 높

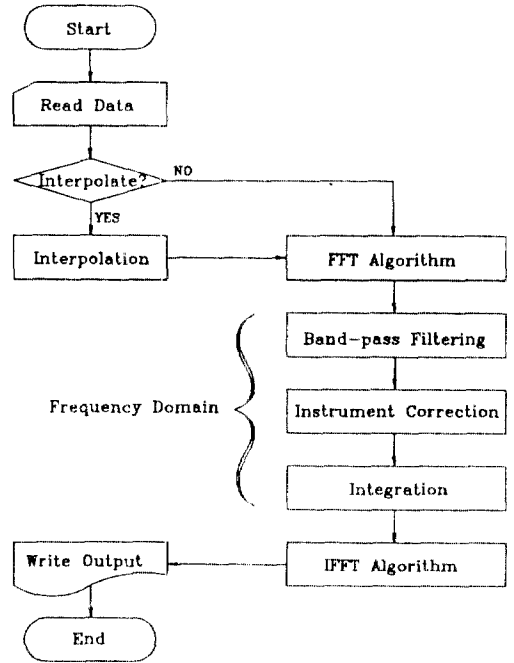


그림 5. 가속도 기록의 보정절차의 흐름도

이기 위해, 실제 보정을 통해 얻을 데이터 갯수보다 많은 데이터를 사용한다.

- 단계 III: Band-pass 필터에 의해 저주파와 고주파 성분의 오차를 제거한다.
- 단계 IV: 가속도계에 의한 진폭과 위상차의 왜곡에 대한 보정을 한다.
- 단계 V: 속도와 변위를 얻기 위해 적분을 수행한다.
- 단계 VI: IFFT 알고리즘을 이용하여 주파수 영역의 가속도, 속도, 변위를 시간 영역으로 변환시킨다.
- 단계 VII: 마지막으로 보정후 얻고자 하는 시간 간격으로 가속도, 속도 및 변위의 시간이력을 얻는다.

위의 보정 절차는 필요한 경우 단계 III 에서 필터링할 주파수의 한계를 변화시켜 다시 반복한다. 이와 같은 보정 절차의 흐름도는 그림 5와 같다.

## 4. 수치계산 예 및 고찰

본 연구에서 제한한 지진 및 동적 실험 데이터의

오차 보정 절차를 실제 동적 실험 데이터에 적용했다. 실험모델은 직사각형 단면의 아크릴재질의 보를 사용하였으며, 가속도계측에는 고유진동수가 45000Hz인 압전형 가속도계가 사용되었다. 제안된 오차 보정 방법에서는 IIR 필터에 의한 보정 방법에 사용된 데이터 갯수 만큼의 영을 더한 후 보정을 함으로써 정확성을 높였다. 그리고 보정하지 않은 데이터의 속도와 변위는 각각 가속도와 변위를 zero-mean을 만든 후 구했다. IIR 필터로는 Chebyshev type II를 사용하였다.

예제 1) 데이터의 시간 간격은 0.0005초이고 실험 모델은 단순보이다. 오차 보정은 제안된 방법과 IIR 필터를 이용한 방법을 사용하였으며, 보정에 사용된 필터의 주파수 특성은 그림 6( $f_{LT}=6\text{Hz}$ ,  $f_L=8\text{Hz}$ ,  $f_H=800\text{Hz}$ ,  $f_{HT}=850\text{Hz}$ )과 같다. 보정 전후의 가속도, 속도 및 변위의 시간이력을 그림 7에 나타내었다. IIR 필터의 차수는 20이다.

예제 2) 데이터의 시간 간격은 0.001초이고 실험 모델은 외팔보이다. 보정에 사용된 필터의 주파수 특성은 그림 8( $f_{LT}=5\text{Hz}$ ,  $f_L=6\text{Hz}$ ,  $f_H=450\text{Hz}$ ,  $f_{HT}=480\text{Hz}$ )과 같으며, 보정 전후의 가속도, 속도 및 변위의 시간이력을 그림 9에 나타내었다. IIR 필터의 차수는 30이다.

이 보정과정은 필터링할 주파수의 선택을 위해 여러번 반복되었다. 그런데 실제 실험 구조물의 정확한 거동을 알기는 매우 어려우므로 보정 후 가속도의 시간이력에는 큰 변화를 주지 않으면서 속도와 변위의 시간이력이 좋은 특성을 나타낼 수 있는 보정 방법이 필요하다. 이 예제들의 경우 실험 구

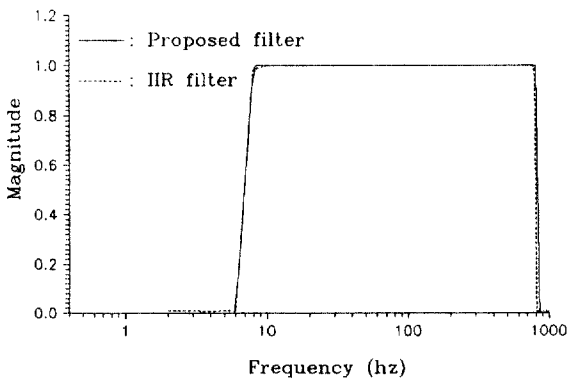
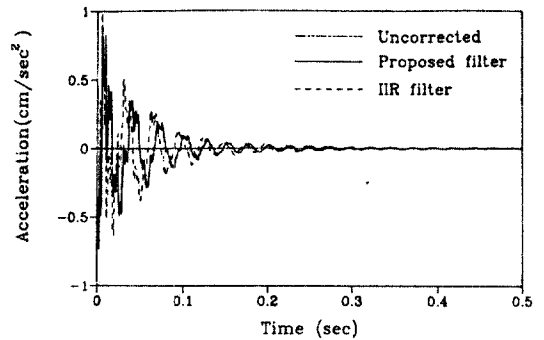
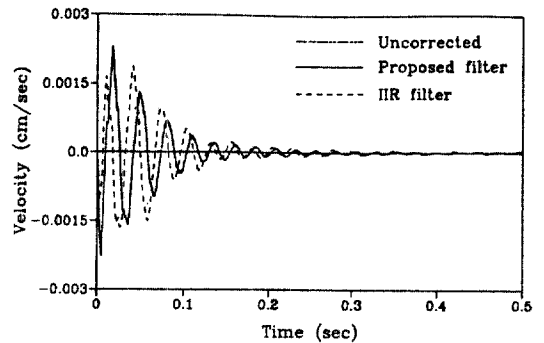


그림 6. 예제 1)에서 필터의 주파수 특성

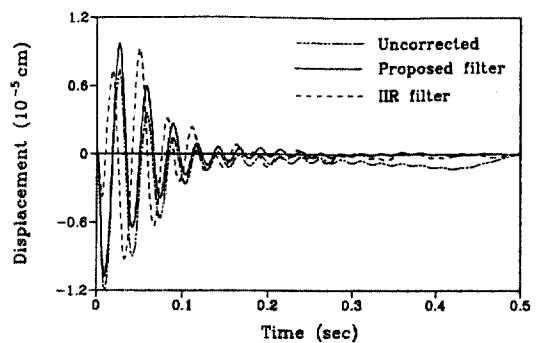
조물은 시간이 경과함에 따라 속도와 변위는 영의 값으로 수렴해야 한다. 그러나 보정하지 않은 데이터를 보면 zero-mean을 한 후 적분을 수행했지만 속도와 변위가 실제 구조물에서 나타나지 않는 특성을 보임을 알 수 있다. 즉 실험과 실험구조물의 특성을 고려할 때 변위나 속도의 시간이력에서는 보정하지 않은 그림과 같은 저주파 성분이 발생하지



(a) 가속도 시간이력



(b) 속도 시간이력



(c) 변위 시간이력

그림 7. 예제 1)의 가속도, 속도, 변위 시간이력

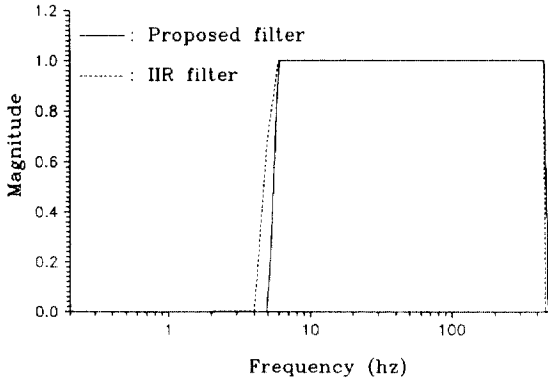


그림 8. 예제 2)에서 필터의 주파수 특성

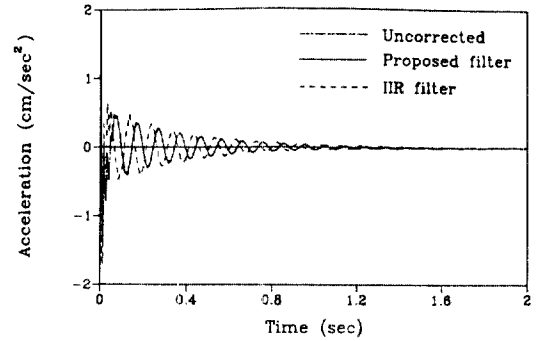
표 1. Band-pass 필터링을 위한 계산 시간 비교  
(단위 : sec)

보정방법	제안된 필터	IIR 필터
예제 1	15.32	21.53
예제 2	15.27	32.03

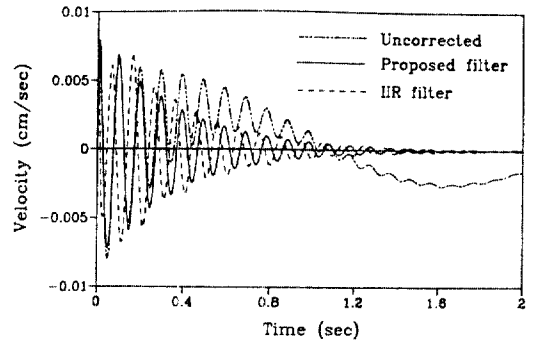
않는다. 따라서 오차 보정은 반드시 필요하다고 생각된다. 두 예제에서 필터의 주파수 특성은 잘 일치하는 것을 볼 수 있다. 그러나 IIR 필터에 의한 보정 결과는 초기 데이터의 왜곡과 위상의 변화가 있음을 알 수 있다. 이는 두 필터의 주파수 특성은 같지만 IIR 필터는 위상을 왜곡시키기 때문이다. 보정 결과로부터 본 연구에서 제안된 주파수 영역에서의 오차 보정 방법이 초기 데이터나 위상을 왜곡시키지 않으면서 좋은 결과를 낳는다는 것을 알 수 있다. 또 필터링 과정에서의 계산량도 제안된 필터가 적음을 알 수 있다. 이것은 표 1에 나타나었다.

## 5. 결 론

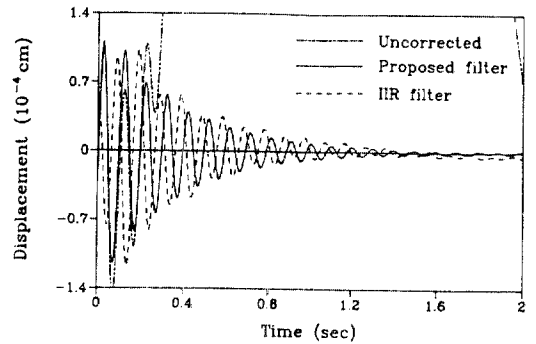
본 연구에서는 가속도 기록의 오차 보정을 좀 더 효율적으로 할 수 있는 방법을 제안했다. 즉 보간법을 사용하여 필요한 시간 간격의 데이터를 만들고 주파수 영역에서 가속도계에 의한 진폭과 위상차의 왜곡을 보정하고, band-pass 필터를 이용하여 저주파와 고주파 성분의 오차를 보정했다. 보정된 가속도 기록을 주파수 영역에서 적분을 함으로써 적분의



(a) 가속도 시간이력



(b) 속도 시간이력



(c) 변위 시간이력

그림 9. 예제 2)의 가속도, 속도, 변위 시간이력

정확성을 높였다. 이와 같은 주파수 영역에서의 가속도 기록의 보정 방법으로부터 얻은 결론은 다음과 같다.

1) 3차 spline 보간법을 이용해 필요한 시간 간격을 가지며, 지진이나 실제 실험 구조물의 거동을 잘 표현할 수 있는 데이터를 만들 수 있었다.



2) 주파수 영역에서 데이터의 미분과 적분을 수행함으로써 계산의 정확성을 높이고 계산량을 줄였다.

3) 주파수 영역에서의 필터링 기법을 사용함으로써 필터의 전달함수를 간단 하고 정확하게 얻을 수 있었고, 또한 필터링 과정에서의 초기 데이터의 왜곡을 없앨 수 있었으며, 필터링 과정에서의 계산량도 IIR 필터나 FIR 필터에 비해 많이 줄일 수 있었다.

4) 주파수 영역에서 오차 보정을 함으로써 오차 보정이 데이터의 진폭과 위상에 어떤 영향을 미치는지를 쉽게 알 수 있었다.

5) 보다 효과적인 오차의 보정을 위해서는 오차의 근본적인 원인 분석 및 특성에 대한 연구가 많이 진행되어야 할 것이다.

### 약어 및 기호

- a : acceleration in time domain
- $a_k$  : denominator coefficients of filter
- A : acceleration in frequency domain
- $A_k, B_k, C_k, D_k$  : coefficient of spline interpolation function
- $b_k$  : numerator coefficients of filter
- c : damping coefficient
- d : displacement in time domain
- D : displacement in frequency domain
- D : dynamic magnification factor
- f : frequency
- $h_k$  : time step
- k : stiffness
- m : mass
- M,N : filter order
- S : spline interpolation function
- t or T : time
- x,y : input or output sequence of digital filter
- x : relative displacement of seismic mass
- $x_g$  : ground displacement
- $\beta$  : frequency ratio
- $\delta$  : variation
- $\xi$  : damping ratio
- $\sigma$  : the second derivative of spline interpolation function
- $\phi$  : phase
- $\omega$  : angular frequency

### 참 고 문 헌

1. D.E.Hudson(1979), "Reading and Interpreting Strong Motion Accelerogram", *Engineering Monographs on Earthquake Criteria, Structural Design, and Strong-Motion Records*, EERI.
2. E.O.Brigham(1974), *The Fast Fourier Transform*, Prentice-Hall.
3. J.H.Mathews(1987), *Numerical Methods for Computer Science, Engineering, and Mathematics*, Prentice-Hall.
4. M.D.Trifunac(1972), "A Note on Correction of Strong-Motion Accelerograms for Instrument Response", *Bull. Seism. Soc. Am.* 62, pp.407~409.
5. M.D.Trifunac, F.E.Udwadia, and A.G.Brady(1973), "Analysis of Errors in Digitized Strong-Motion Accelerograms", *Bull. Seism. Soc. Am.* 63, pp. 157~187.
6. M.D.Trifunac and V.W.Lee(1974), "A Note on The Accuracy of Computed Ground Displacements from Strong-Motion Accelerograms", *Bull. Seism. Soc. Am.* 64, pp.1209~1219.
7. M.Erdik and J.Kubin(1984), "A Procedure for The Accelerogram Processing", *Eighth World Conference on Earthquake Engineering*, Vol II, pp. 135~142.
8. O.Khemic(1984), "Frequency Domain Corrections of Earthquake Accelerograms with Experimental Verifications", *Eighth World Conference on Earthquake Engineering*, Vol II, pp.103~110.
9. R.Kuc(1988), *Introduction to Digital Signal Processing*, McGraw-Hill.
10. S.D.Stearns and R.A.David(1988), *Signal Processing Algorithms*, Prentice-Hall.
11. S.S.Sunder and J.J.Connor(1982), "A New Procedure for Processing Strong-Motion Earthquake Signals" *Bull.Seism.Soc.Am.* 72, pp.643~661.
12. V.W.Lee(1984), "Recent Developments in Data Processing of Strong-Motion Accelerograms", *Eighth World Conference on Earthquake Engineering*, Vol II, pp.119~126.
13. 이재갑(1988), "스트레인 게이지를 이용한 가속도계의 설계, 제작 및 보정에 관한 연구", 석사학위논문, 한국과학기술원.
14. 박창호, 이동근, "Accelerogram의 보정에 관한 연구", *토목학회 학술발표회 개요집*, 1990.

(接受 : 1992. 9. 5)