한국전산구조공학회
1992년도 봄학술발표회 논문집

類似動的實驗 誤差의 分析 및 補正

Analysis and Correction of Experimental Errors in Pseudodynamic Test

oKim, Nam-Sik* Lee, Sang-Soon** Chung, Woo-Jung*** Lee, Dong-Guen****

ABSTRACT

The Pseudodynamic test is a new experimental technique for simulating the earthquake response of structures or structural components in the time domain. It is especially efficient for testing structures that are too large, heavy or strong to be tested on a shaking table. But the obtained responses in the Pseudodynamic test are distorted by the experimental errors inevitably during control and measurement procedures. The studies are to investigate the effects of the experimental errors on the Pseudodynamic responses and apply a correction method to the Pseudodynamic testing algorithm. It is shown that the corrected responses using the Equivalent Energy Compensation Method are in a good correlation with the theoretical ones. Thus, the corrected Pseudodynamic responses could be reliable for evaluating the seismic performance of structural systems.

1. 序論

耐震性能評價를 위한 실험기법으로는 지진하중을 비교적 정확히 재현할 수 있는 振動臺實驗(Shaking Table Test)기법이 있으며, 지금까지 수많은 연구에 진동대가 활용되었으나 진동대의 크기및 용량의 제한때문에 대부분의 진동대 실험은 1/3이하의 축소시험체에 제한하여 수행되고 있다.[1] 따라서 원형시험체와 축소시험체사이에 타당성있는 相似性(similitude)이 확보되어야만 이러한 진동대실험의 결과에 신뢰를 가질 수 있다. 특히, 철근콘크리트 구조물에서는응력-변형도관계(stress-strainrelationship)에 대한 상사성을 기초로하여 재료거동 특성을 비교적 정확히 가정하여도 전체구조물의 비탄성거동이 국부적인 재료비선형에 의해 지배되기 때문에 축소시험체를 통한 실험결과에는 많은 불확실성을 가지고 있다. 결과적으로 지진하중에 대한 실제적인 거동을 예측하기 위해서는 1/3이상의 축소시험체에 대한 실험이 필수적이다[1].

대규모 시험체에 대한 동적실험을 위해서 새롭게 개발된 실험기법으로서 유사동적실험(Pseudodynamic Test)기법이 있는데, 이 기법은 準靜的實驗(Quasi-static Test)에 이용되는 간편한 실험장비로써 진동대 실험에서와 같은 결과를 얻을 수 있는 장점을 가지고 있기 때문에 최근에 와서 주목을 끌기 시작하였다[2]. 1969년 Hakuno[3]에 의해서 최초로 유사동적 실험기법의 기본적인 개념이 발표되었고, 이후 지진하중에 대한 구조물의 비탄성 동적거동 실험이 Takanashi[6]에 의해서 이루어졌다.

본 연구에서는 유사동적 실험기법의 효율성 및 적용성을 평가하기 위하여 개발된 유사동적실험 알고리즘을 통하여 유사동적실험을 수행하는 과정에서 필연적으로 발생하는 실험오차의 특성 및 보정방법에 대하여 고찰하였으며, 실험오차의 보정절차가 포함된 유사동적실험 알고리즘을 이용하여 단자유도의 시험체에 대하여 지진응답실험을 수행하였다.

* 正會員, 韓國科學技術院 土木工學科 博士過程
** 正會員, 韓國道路公社 道路硏究所 硏究員
*** 正會員, 韓國科學技術院 土木工學科 碩士過程
****正會員, 韓國科學技術院 土木工學科 助敎授

2. 實驗方法

유사동적실험은 기존의 동적수치해석과 동일한 방법으로 구조물의 관성 및 감쇠특성뿐 아니라 외부작용하중(external load)을 컴퓨터내에서 수치적으로 고려한다. 그러나 구조물의 복원력에 대한 특성은 특히 시험체가 비탄성범위에 있을 경우에 이론적인 모델을 사용하여 예측하기에 어려움이 많기 때문에 유사동적실험에서는 실험이 시간단계(time step)에 따라 진행되는 과정에서 변위제어에 의해 변형된 시험체로부터 계측한 복원력을 수치적분과정에 직접 대입한다. 수치적분, 변위의 제어, 복원력의 계측을 매 시간단계마다 반복적으로 수행하여 시험체의 지진응답을 얻을 수 있다. 지진하중이 시험체의 기초에서 실시간(real time)으로 직접 작용하는 진동대실험처럼, 구조물의 지진응답을 유사동적실험을 수행하여 근사적으로 얻을 수 있으며, 수치적분 알고리즘에 적용되는 운동방정식내에 동적효과가 고려되었기 때문에 매 시간단계에서 계산된 변위가 정적으로 시험체에 제어된다. 유사동적 실험기법의 전체적인 알고리즘은 그림 2.1과 같다. 표 2.1 및 그림 2.2에서는 유사동적실험에 적용한 실험시스템의 개요 및 시험체의 제원을 보이고 있으며, 그림 2.3은 본 실험에서 사용한 유사동적실험 장치의 구성도를 나타낸다.

3. 類似動的實驗의 誤差

유사동적 실험기법은 수치적인 해석과 물리적인 실험이 결합되어 있기 때문에 실험이 진행되는 과정에서 다양한 오차원인(error source)을 내포하고 있다. 유사동적실험의 오차를 크게 분류하면 수치적분오차(numerical errors)및 실험오차(experimental errors)가 있다. 실험오차는 랜덤오차(random errors)와 주기적인 오차(systematic errors)로 나눌 수 있으며, 수치적분오차보다 실험결과에 커다란 영향을주기 때문에 본 연구에서는 실험오차에 대하여 고찰하고자 한다.

3.1 랜덤 오차(Random Errors)

랜덤오차는 A/D변환기(analog to digital converter)의 제한된 분해능력(resolution)에 의해 주로 아날로

그 신호가 디지탈 신호로 변환하면서 발생하는 반올림오차(round-off errors)로 나타난다. 즉, A/D변환기의 비트수에 직접적으로 의존하기 때문에 아날로그 신호의 분해능력에 따라 랜덤오차의 크기가 좌우된다. 계측장비, 전선의 자장(eletrical noise), 그리고 아직 잘 파악되지 않은 요인들에 의해 랜덤오차는 발생할 수 있다. 랜덤오차를 제거하기는 어렵지만 오차의 크기는 일반적으로 작으며, 주기적인 오차보다 실험결과에 적은 영향을 미치고 있다[5].

3.2 주기적인 오차(Systematic Errors)

실험결과를 크게 왜곡시키는 주된 실험오차는 주기적인 오차로서 불안정한 실험장비의 사용 및 불합리한 실험방법의 적용등에 의해 주로 나타나며, 일반적으로 시험체의 고유진동수와 일치하는 주파수성분(frequency content)을 갖고 있기 때문에 오차의 누적효과(error propagation effect)가 실험결과에서 매우 크게 나타난다. 그러나 대부분의 주기적인 오차는 오차원인의 정확한 분석 및 합리적인 실험방법의 적용등으로 상당히 작게 줄이거나 피할수 있다[4].

가) 계측장비의 오차(Miscalibration Errors)

실험에 사용되는 계측장비는 일반적으로 변환계수(calibration factor)를 통하여 입력신호와 출력신호사이의 관계를 결정한다. 정상적인 계측장비에서는 이러한 관계가 사용범위내에서 선형성을 가져야하며, 정확한 변환계수를 실험 수행전에 결정하는것이 실험오차를 최소로할 수 있는 방법이다. 그러나, 계측장비의 비선형성 및 부정확한 변환계수에 의해 시험체의 특성치에 오차가 포함됨으로서 결과적으로 실험결과를 왜곡시킬 수 있다.

나) 절단오차(Truncation Errors)

D/A변환기(digital to analog converter)를 통하여 디지탈 신호를 아날로그 신호로 변환할 경우에, 즉 유사동적실험 프로그램에서 계산된 변위를 시험체에 제어하기 위하여 유압식가력기의 제어기(controller)에 아날로그 신호를 보낼 경우에 흔히 절단오차가 발생한다. 이것은 사용한 D/A변환기의 특성때문에 실제 디지탈 컴퓨터상에서 명령한 값보다 작은 값이 출력된다. 따라서 절단오차는 실험결과에 에너지부가현상(energy addition effect)으로 나타난다.

다) 마찰오차(Friction Errors)

시험체와 일체로 설치된 가력장치에서 발생하는 실험오차의 원인은, 일반적으로 유압식가력기의 지지장치에서 일어나는 변형 및 유압식가력기와 시험체의 연결부위에서 나타나는 마찰력으로 구분할 수 있다. 지지장치의 변형은 보통 지점의 미끄러짐(slippage)과 국부변형이 대부분이며, 마찰력은 유압식가력기의 Swevel Head 및 피스톤에서 발생한다. 실험에 앞서 유압식가력기의 용량 및 지지조건에 대한 세밀한 설계가 이루어 진다면 지지장치의 변형은 방지할 수 있다. 그러나 유압식가력기가 양단힌지의 구조로 되어 있기 때문에 완벽한 힌지역할을 못할 경우 커다란 마찰력을 발생시키며 힌지에서 발생되는 유격(backlash) 또한 실험결과에 큰 영향을 준다. 여기서 마찰력에 의한 에너지소산현상(energy dissipation effcet)은 실험결과에 마찰감쇠(Coulomb damping)로 나타나며, 대체로 이러한 감쇠는 변위의 크기에 비례하는 감쇠현상을 보이기 때문에 일반적으로 구조물에 적용되는 점성감쇠(viscous damping)와는 구별된다. 마찰감쇠에 의한 에너지소산현상은 실험결과에 커다란 실험오차를 야기시키며 이를 제거하는 방법으로는 등가에너지 보상법(Equivalent Energy Compensation Method)이 있다[5].

라) 변위제어 오차(Displacement Control Errors)

변위제어 오차는 부정확한 Gain의 조절 또는 Servovalve용량에 의해 주로 발생되며, 시험체의 응답주기(변위 또는 속도)와 90° 또는 -90°의 위상차(phase lag)를 갖음으로서 실험결과에 에너지부가현상 혹은 에너지소산현상이 나타난다[5]. 만일 유압식가력기의 Gain이 높으면 변위제어를 위한 명령신호(command signal)의 제어속도가 빨라짐으로서 Overshoot가 일어나며, 이와 반대의 경우에는 Undershoot가 일어난다. Overshoot는 에너지소산현상으로 나타남으로서 시험체의 전체적인 변위응답을 감쇠시키며, Undershoot의 경우에는 에너지부가현상이 발생하여 누적된 실험오차는 시험체의 변위응답에 공진(resonance)과 같은 효과로 나타난다. 다자유도 시험체에 대한 유사동적실험에서는 일반적으로 고차모드에서 실험오차의 커다란 증폭효과가 있기 때문에 Overshoot가 발생하도록 Gain을 조절하는것이 유리하다[1]. 따라서 유사동적실험의 신뢰성, 효율성 그리고 실용성을 위해서는 이러한 변위제어 오차에 대하여 보다 세밀히 조사해야 한다.

4. 實驗誤差의 分析

시험체의 고유진동수, Coulomb감쇠 및 다양한 실험오차를 얻기 위하여 수치적분 알고리즘내에서 집중질량은 1560kg, 감쇠비는 영으로 하며 Δt를 0.02초로 하여 자유진동실험을 수행한 결과는 그림 4.1(a) 및 그림 4.1(b)와 같다. 자유진동실험 결과에서 변위제어 및 계측과정으로부터 얻어진 변위오차(displacement errors), 즉 계산된 변위와 계측된 변위의 차는 비록 작게 나타났지만 변위응답에서 커다란 에너지소산현상이 일어났다. 따라서, 이러한 오차의 원인을 파악함으로서 적절한 보정절차가 포함된 실험알고리즘을 통하여 실험결과를 얻어야 한다.

일반적으로 유사동적실험에서는 계산된 변위를 시험체에 제어하는 과정에서 실험오차가 발생하며 또한 시험체로부터 복원력과 변위를 계측하는 과정에서 실험오차가 생긴다. 변위제어 오차 $e^{dc}(i)$ 및 변위와 복원력의 계측오차 $e^{dm}(i)$,$e^{rm}(i)$들을 포함한 관계식은 다음과 같다[5].

$$d_m(i) = d_c(i) + e^d(i) = d_c(i) + e^{dc}(i) + e^{dm}(i) \quad (4.1)$$

$$r_m(i) = r_c(i) + e^r(i) = r_c(i) + k\cdot e^{dc}(i) + e^{rm}(i) \quad (4.2)$$

여기서 $d_c(i)$는 i시간단계에서의 계산된 변위, $d_m(i)$는 계측된 변위, $r_m(i)$는 계측된 복원력, $r_c(i)$는 $d_c(i)$에 해당되는 복원력을 나타낸다. 또한 k는 시험체의 강성을 의미한다. 식 (4.1)과 식 (4.2)에서 정의한 실험오차는 매 시간단계에서 수치적분과정에 포함되어 실험이 진행됨에 따라 오차의 누적효과가 실험결과에 점점더 크게 나타난다. 실험오차의 누적효과가 변위응답에 미치는 영향을 파악하기 위하여 Shing & Mahin[5]이 유도한 식들을 사용하였으며, 그림 4.2은 각각 자유진동실험에서 직접 얻어진 변위제어오차 및 $e^d(i)$ 및 $e^r(i)$에 의해서 누적된 변위오차를

보이고 있다. 여기서 $e^d(i)$ 및 $e^r(i)$에 의해서 누적된 변위오차는 오차의 주기적인 특성에 의해서 누적효과가 나타나며 $e^{dm}(i)$ 및 $e^{rm}(i)$는 랜덤오차의 특성을 갖고있기 때문에 본 연구에서는 $e^d(i)$ 및 $e^r(i)$의 누적된 변위오차를 각각 $e^{dc}(i)$ 및 $k \cdot e^{dc}(i)$성분만으로 나타내었다. 그림 4.2의 실험결과로는 변위제어오차 $e^{dc}(i)$에 의한 누적효과가 두드러지게 나타나고 있다. 그러나 실험알고리즘에서는 계산된 변위 $d_c(i)$를 사용하여 다음 시간단계의 변위를 계산하므로 $e^{dc}(i)$에 의한 오차누적효과는 없으며, 단지 그림 4.2(c)에서 얻어진 $e^r(i)$에 의한 누적효과가 실험결과에 포함된다. 따라서 그림 4.2(c)에서 얻어진 누적된 변위오차는 변위제어 및 계측과정에서 발생한 복원력 오차에 기인한 것이며 실험결과에 큰 영향을 주지않는 실험오차로 드러났다. 일반적으로 변위제어 및 계측과정에서 발생되는 실험오차의 누적효과는 계산된 변위를 실험알고리즘내에서 사용함으로서 크게 줄일 수 있다[5].

본 실험에서는 변위제어 및 계측과정에서 실험오차의 누적효과가 비교적 작게 발생하였지만 자유진동실험에서 얻어진 변위응답에서는 커다란 에너지소산현상이 발생하였다. 이와 같은 현상은 가력장치의 마찰력에 의한 Coulomb감쇠로 해석되며, 식 (4.3)에서와 같이 운동방정식내에서 계산된 변위에 해당하는 복원력 $r_c(i)$와 계측된 복원력 $r_m(i)$의 차에 의해서 에너지소산현상이 발생한 것으로 설명할 수 있다. 식 (4.3)에서 에너지소산을 야기시키는 항 $\{r_c-r_m\}$은 변위제어오차에 대응하는 복원력오차 및 변위의 방향에 따라 일정하게 가정한 마찰력의 합으로 구성된다.

$$[m]\{a\}+[c]\{v\}+\{r_c\} = \{F_{ext}\}+\{r_c-r_m\} \quad (4.3)$$

여기서,

$\{r_c\} = [k]\{d_c\}$
$\{r_m\} = \{r_c\} + \{e^r\} + sgn(\{v\})\cdot F_d$
$\{F_{ext}\}$ = external load vector

그림 4.3에서 $\{r_c-r_m\}$값과 계산된 변위응답결과를 비교하였다. 그림에서 $\{r_c-r_m\}$값은 변위응답과 90°의 위상차를 가지며 마찰에 의한 에너지소산현상을 보이고 있다.

5. 實驗誤差의 補正

자유진동실험에서 얻은 변위응답의 에너지소산현상은 가력장치의 마찰력에 의한 영향으로 나타났으며, 변위응답결과에서 나타난 에너지소산현상을 제거하기 위한 방법으로 식 (5.1)에서와 같이 Shing & Mahin[5]이 제안한 등가에너지 보상법(Equivalent Energy Compensation Method)을 이용하여 補正力(correction force)을 얻었다. 식 (5.1)은 식 (4.3)에서 점성감쇠가 영인 경우의 에너지 방정식으로서 에너지보존법칙(conservation of energy principle)을 만족시키는 보정력 F_c를 구한다.

$$\tfrac{1}{2}\{v\}^T[m]\{v\} + \tfrac{1}{2}\{r_m\}^T\{d_m\} =$$

$$\int_0^t\{v\}^T[sgn(\{v\})\cdot F_c]dt + \int_0^t\{v\}^T\{F_{ext}\}dt \quad (5.1)$$

여기서, E[·]이 에너지의 量을 표시하다면 식 (5.2)와 같이 보정력 F_c에 대한 등가에너지가 실험오차에 의해 소산된 에너지와 평형을 이룬다.

$$E[sgn(\{v\})\cdot F_c] = E[\{e^r\} + sgn(\{v\})\cdot F_d] \quad (5.2)$$

등가에너지 보상법은 운동방정식내에서 에너지가 보존되지 못하고 소산 또는 부가에너지가 발생하는 경우에 에너지보존을 이루기 위해 상응하는 일정한 크기의 보정력을 구함으로서 에너지의 변화를 제거하는 방법이다. 그러나 다자유도 시험체에 대한 유사동적 실험결과에 대해서는 각 자유도들사이에 복잡한 상호작용관계가 존재함으로 상기 방법을 적용할 경우에는 각 자유도에서의 보정력들이 동시에 만족되지 않기 때문에 보정력이 작은 값에 수렴하도록 실험 및 보정을 반복하여야 한다[5].

그림 5.1은 자유진동실험에서 얻은 변위응답결과를 등가에너지 보상법을 이용하여 보정력의 수렴과정을 보이고 있다. 여기서 구한 보정력 F_c는 약 8.4kg으로서 대부분 마찰력에 해당하는 값으로 식 (5.3)과 같이 유사동적실험 알고리즘상에서 계측한 복원력 $\{r_m\}$ 대신에 $\{r_{corrected}\}$를 수치적분과정에 대입하여 에너지부가현상이 일어나도록 작용시킴으로서 에너지 손실이 없는 보정된 응답결과를 얻을 수 있다.

$$\{r_{corrected}\} = \{r_m\} - sgn(\{v\})\cdot F_c \quad (5.3)$$

그림 5.2(a)와 그림 5.2(b)는 보정력에 의해서 에너지소산을 제거하여 얻어진 변위응답과 변위제어오차이다. 그림 5.2(a)에서 변위응답은 이상적인 자유진동을 나타내었으며, 그림 5.2(b)의 변위오차는 補正前의 실험결과에 비하여 주기적인 특성이 상당히 줄어들었다. 그림 5.2(c), 그림 5.2(d) 및 그림 5.2(e)는 변위제어오차 및 복원력오차에 의해서 누적된 변위오차이며, 그림 4.2의 누적된 변위오차에 비하여 상당히 줄어들었음을 알 수 있다.

에너지 보정절차가 포함된 유사동적실험 알고리즘을 이용하여 지진응답실험을 수행하였다. 입력지진파는 Taft N21E성분으로서 0.06g의 최대지반가속도를 갖는 입력하중을 사용하였으며 시험체의 점성감쇠비를 1%로 가정하여 지진응답실험을 수행한 결과는 그림 5.3에 보이고 있다. 그림 5.3(b)에서 보정된 변위응답결과는 수치해석결과와 잘 일치함으로서 에너지 보정에 의한 유사동적실험결과는 충분한 신뢰성을 갖는 실험결과로 판단된다. 그림 5.3(e)와 그림 5.3(f)는 보정前과 보정後에 얻어진 변위오차의 Power Spectrum으로서 보정후의 변위오차에서도 주기적인 특성은 여전히 제거되지 않았지만 변위오차의 영향이 다소 줄어들었음을 알 수 있다.

6. 結論

본 연구에서는 유사동적실험결과에 필연적으로 나타나는 실험오차의 원인을 분석하였으며, 효율적인 오차보정법에 대하여 고찰하였다. 유사동적실험의 오차는 대부분 주기적인 특성을 갖고 있기 때문에 실험결과에서 에너지소산현상 또는 에너지부가현상이 나타나며, 이러한 실험오차를 제거하는 방법으로서 등가에너지 보상법을 적용하였다. 본 연구에서 이러한 오차보정방법을 적용하여 단자유도 시험체에 대한 지진응답실험을 수행하였다. 지진응답실험에서 나타난 실험오차는 효율적으로 제거되었으며 응답결과는 수치해석결과와 잘 일치하였다. 결과적으로 본

연구에서 개발한 유사동적실험 알고리즘의 타당성이 입증되었으며, 구조물의 내진성능평가를 위한 효율적인 실험기법으로 판단된다.

參考文獻

1. P.B.Shing and S.A.Mahin, "Pseudodynamic Test Method for Seismic Performance Evaluation : Theory and Implementation", Earthquake Engineering Research Center, Report No. UCB/EERC-84/01, January, 1984.
2. S.A.Mahin and P.B.Shing, "Pseudodynamic Method for Seismic Testing", Journal of Structural Engineering, ASCE, Vol.111, No.7, 1985, pp.1482-1503.
3. 伯野元彦.四俣正俊.原司, "計算機により制御された, はりの動的破壊實驗", 日本土木學會論文報告集, 第 171號, 1969, pp.1-9.
4. C.A.Thewalt and S.A.Mahin, "Hybrid Solution Techniques for Generalized Pseudo-dynamic Testing",EarthquakeEngineeringResearchCenter, Report No. UCB/EERC-87/09, July, 1987.
5. P.B.Shing and S.A.Mahin, "Experimental Error Propagation in Pseudodynamic Testing", Earthquake Engineering Research Center, Report No. UCB/EERC-83/12, June, 1983.
6. K. Takanashi, et al., "Seismic Failure Analysis of Structures by Computer-Pulsator On-Line System", Bull. of Earthquake Resistant Structure Research Center, Institute of Industrial Science, University of Tokyo. No. 11, 1974, pp.13-25.

표 2.1 실험시스템 개요

Hydraulic Actuator Capacity	Load Cell	±500KN
	LVDT	±150mm
Control Type	Displacement Control (Overshooting)	
Ramp Function	Haver-sine (Increment steps = 1000points)	
Numerical Integ. Method	Explicit Newmark Method (Time Interval = 0.02sec) (Mass:2ton, Stiffness:39kg/mm²)	
A/D Converter	12bit, 16ch(±10V),Sampling Rate:50Hz	
D/A Converter	12bit, 2ch(±10V)	
Error Bound	0.05mm, 0.05% of Full Range (LVDT)	

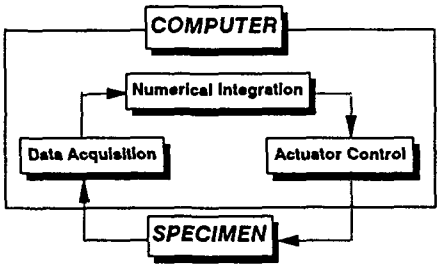


그림 2.1 유사동적실험기법의 알고리즘

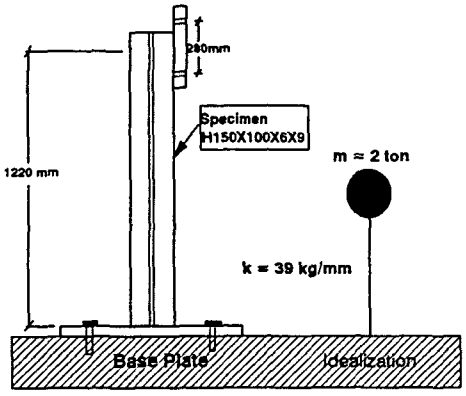


그림 2.2 시험체의 제원 및 이상화

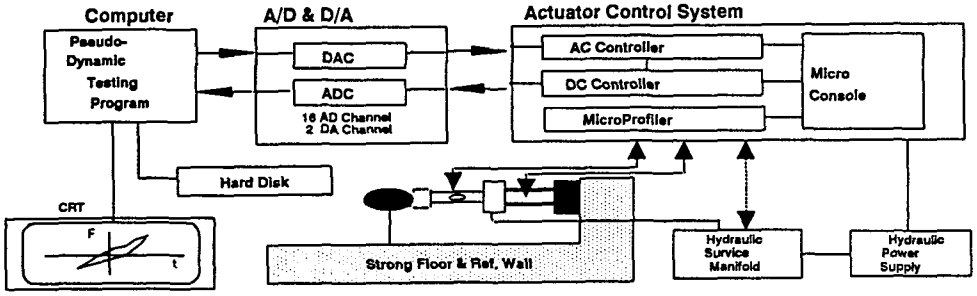
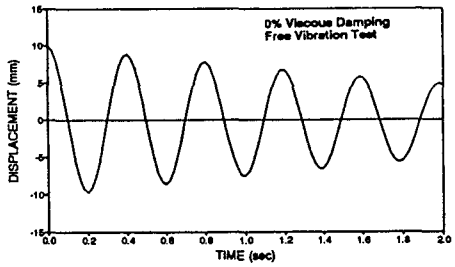
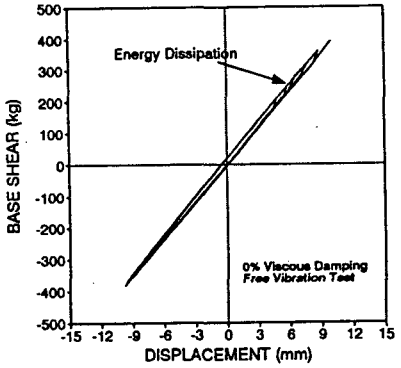


그림 2.3 유사동적실험장치의 구성도



(b) 힘-변위 이력곡선



(a) 변위응답결과

그림 4.1 자유진동에 의한 유사동적실험결과
(초기변위=10mm, Δt=0.02sec)

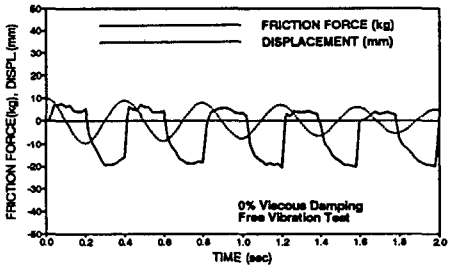


그림 4.3 변위응답과 {rc-rm}값의 관계

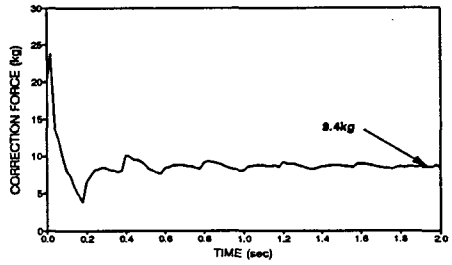
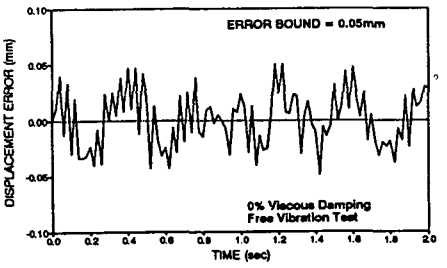
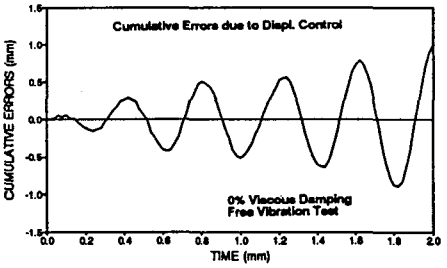


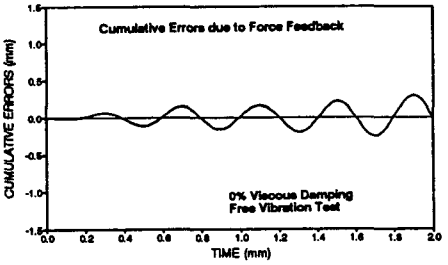
그림 5.1 보정력 F_c의 수렴과정



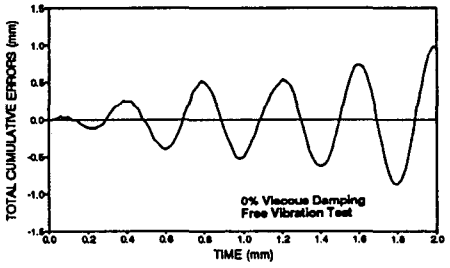
(a) 변위오차[$e^{dc}(i)+e^{dm}(i)$]



(b) 변위제어오차에 의해 누적된 변위오차[$e^{dc}(i)$]

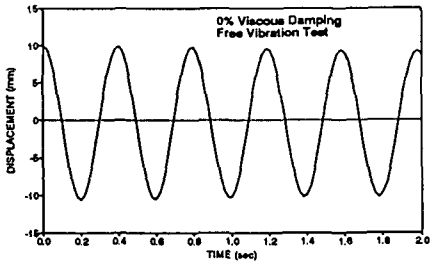


(c) 복원력오차에 의해 누적된 변위오차[$k\cdot e^{dc}(i)$]

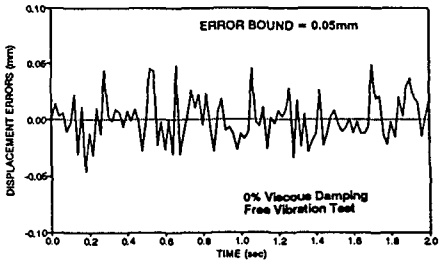


(d) 누적된 전체 변위오차[$e^{dc}(i)+k\cdot e^{dc}(i)$]

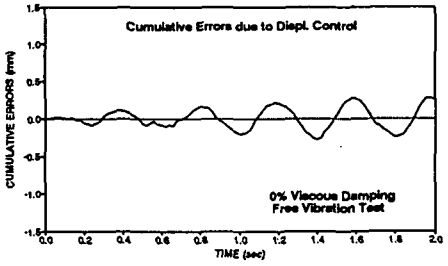
그림 4.2 유사동적실험에서 얻어진 오차의 누적효과
(자유진동실험, 초기변위=10mm, Δt=0.02sec)



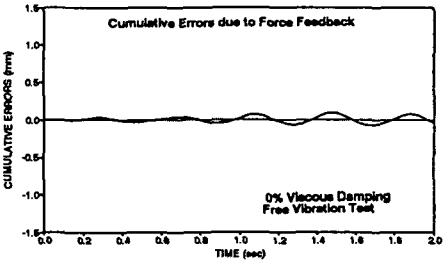
(a) 변위응답결과



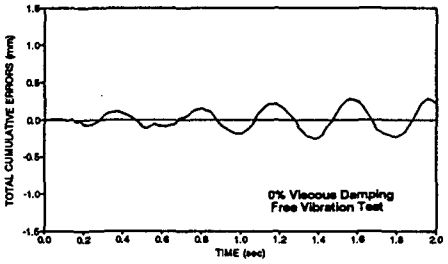
(b) 변위오차[$e^{dc}(i)+e^{dm}(i)$]



(c) 변위제어오차에 의해 누적된 변위오차[$e^{dc}(i)$]

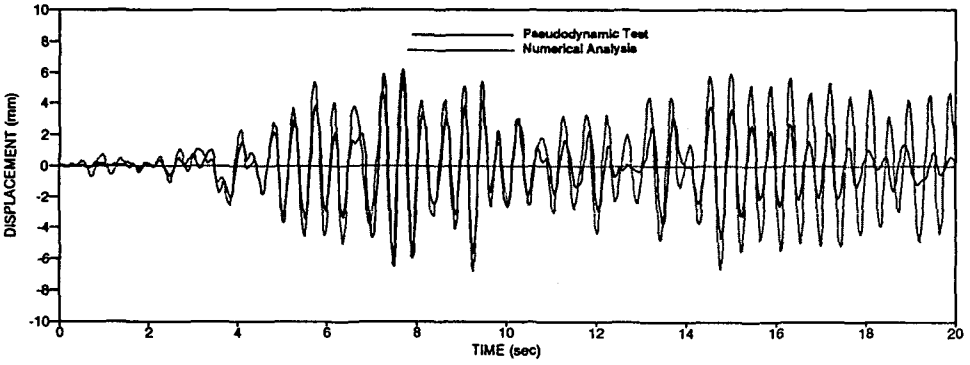


(d) 복원력오차에 의해 누적된 변위오차[$k\cdot e^{dc}(i)$]

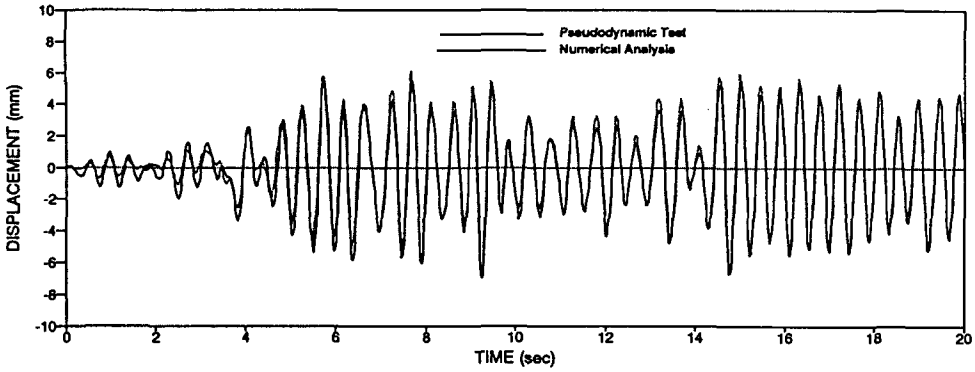


(e) 누적된 전체 변위오차[$e^{dc}(i)+k\cdot e^{dc}(i)$]

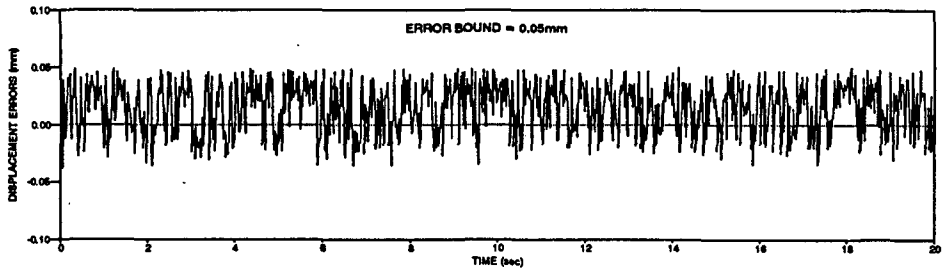
그림 5.2 에너지 보정에 의한 유사동적실험결과
(자유진동실험, 초기변위=10mm, Δt=0.02sec)



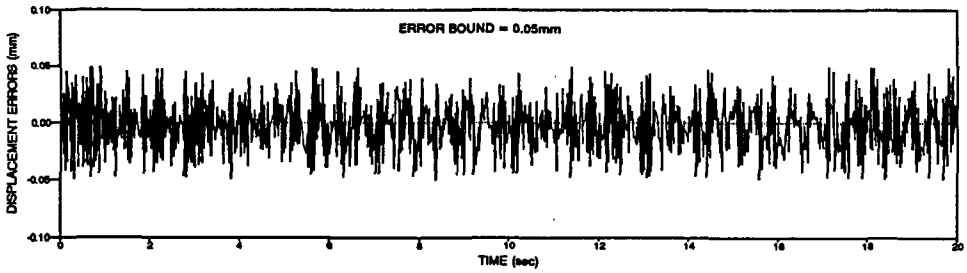
(a) 보정되지 않은 변위응답결과



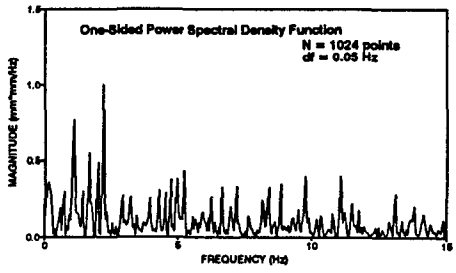
(b) 보정된 변위응답결과



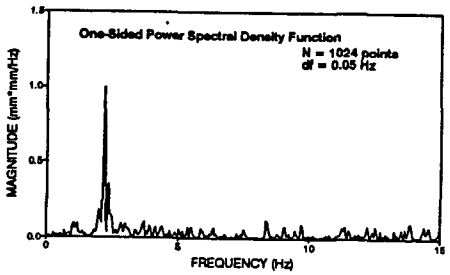
(c) (a)에 대한 변위오차[$e^{dc}(i)+e^{dm}(i)$]



(d) (b)에 대한 변위오차[$e^{dc}(i)+e^{dm}(i)$]



(e) (c)에 대한 Power Spectrum



(f) (d)에 대한 Power Spectrum

그림 5.3 지진하중에 대한 유사동적실험결과
(Taft 0.06g, 점성감쇠비=1%, Δt=0.02sec)