

등가에너지 보상을 통한 유사동적 실험의 보정

Correction of Pseudo-Dynamic Test by Equivalent Energy Compensation

김남식* · 이상순** · 정우정*** · 이동근****

Kim, Nam Sik · Lee, Sang Soon · Chung, Woo Jung · Lee, Dong Guen

Abstract

The Pseudo-dynamic 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 specimens that are too large, heavy or strong to be tested on a shaking table. But, in general, the responses obtained in the Pseudo-dynamic test can be distorted by the experimental errors inevitably during control and measurement procedures. The studies are to investigate the effects of the experimental errors on the Pseudo-dynamic responses and apply a correction method to the Pseudo-dynamic 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 Pseudo-dynamic responses could be reliable for evaluating the seismic performance of structural systems.

요 지

유사동적 실험은 시험체에 대한 물리적인 실험에 이론적인 수치해석방법을 접목시킨 실험기법으로서, 특히 규모가 큰 시험체에 대하여 진동대실험 보다 효율적으로 지진응답실험을 수행할 수 있도록 최근에 개발된 방법이다. 본 연구에서는 유사동적실험 수행과정에서 발생하는 실험오차를 분석하여 실험결과를 보정함으로써, 내진성능실험을 위해서 유사동적실험기법을 광범위하게 적용할 수 있는 가능성을 제시하고자 한다.

1. 서 론

외부하중이 작용하는 경우에 구조물의 안정성 및 사용성을 확보하기 위해서 이에 대한 정확한 해석

및 설계가 요구된다. 특히, 지진하중에 대한 구조물의 비탄성 동적거동의 이론적인 예측은 현재까지도 여러가지 이론적인가정을 통하여 수행되고 있는 실정이며, 따라서 이러한 가정으로 인한 수치해석의 문제점을 해결하기 위한 방법으로서 실험적인 연구에 의존하고 있다. 즉, 실험결과를 토대로 이론적인 가정의 타당성을 검증할 수 있는 것이다. 더구나

* 정회원 · 한국과학기술원 토목공학과 박사과정

** 정회원 · 한국도로공사 도로연구소 연구원

*** 정회원 · 한국과학기술원 토목공학과 석사과정

**** 정회원 · 한국과학기술원 토목공학과 부교수

새로운 형태의 구조물에 대한 해석과 설계는 충분한 연구결과를 토대로 하며, 구조적인 특성을 파악하기 위하여 실험적인 연구가 수반된다. 전체구조물 또는 부분구조물(substructure)에 대한 비탄성 이력특성을 얻기 위한 기존의 가장 보편적인 실험기법으로는 준정적 실험기법(Quasi-static test)이 있다. 준정적 실험기법은 시험체의 크기에 특별한 제한이 없으며 실험장치는 간편하지만, 재하이력곡선(loading history)을 실험전에 미리 결정하여 수행하기 때문에 구조물의 동적효과(dynamic effect)를 고려하기는 어려운 문제점이 있다. 또한 구조물의 내진성능평가를 위하여 개발된 실험기법으로는 지진하중을 비교적 정확히 재현할 수 있는 진동대 실험기법(Shaking table test)이 있다. 그러나 이 실험기법에는 고가의 실험장비가 필수적이며 진동대의 크기 및 성능에 따라 제한된 크기의 축소시험체를 사용하여야 하는 단점을 가지고 있다.

기존의 두가지 실험기법의 장점을 이용한 새로운 실험기법으로서 유사동적 실험기법(Pseudo-dynamic test)이 개발되고 있다. 유사동적 실험은 준정적 실험에 이용되는 간편한 실험장비를 사용하여 진동대 실험과 유사한 결과를 얻을 수 있는 장점을 가지고 있기 때문에, 최근에 와서 주목을 끌기 시작하였다.⁽²⁾ 1969년 일본의 Hakuno⁽³⁾에 의해서 최초로 유사동적 실험기법의 기본적인 개념이 발표되었고, 약 5년 후 지진하중에 대한 구조물의 비탄성 동적 거동을 연구하기 위해서 디지털 컴퓨터를 이용한 유사동적 실험기법이 일본 동경대학의 Takanashi⁽⁶⁾에 의해서 개발되었다.

유사동적 실험기법의 가장 중요한 절차는 정확한 변위의 제어와 발생한 복원력(restoring force)의 계측이다. 소위 유사동적 실험기법은 기존의 준정적 실험기법에 수치적분과정(numerical integration algorithm)을 결합함으로써 동적효과를 재현시키는 것이다. 따라서 수치적분과정에서 운동방정식을 적절히 구성함으로써 유사동적 실험기법을 통하여 기하학적인 비선형성, 3방향 및 다지지점 지진하중 효과, 지반-구조물 상호관계등을 고려하여 실험을 수행할 수 있다. 또한 유사동적 실험기법에 이론적인 substructuring 기법을 도입하여 비탄성거동을 지배하는 부분구조물에 대한 실험을 통하여 효율적으로

전체구조물의 지진응답결과를 얻을 수 있다.

본 연구에서는 효율적이며 광범위하게 응용할 수 있는 유사동적실험 알고리즘을 개발하였다. 개발된 유사동적실험 알고리즘은 크게 수치적분과정을 통하여 계산된 변위의 제어, 제어가 완료된 후 얻어지는 복원력의 계측 및 다음 시간단계(time step)에서의 변위, 속도 및 가속도의 계산으로 구성되어 있다. 또한, 유사동적실험을 수행하는 과정에서 필연적으로 발생하는 실험오차의 특성 및 보정방법에 대하여 고찰하였으며, 실험오차를 보정한 유사동적 실험 알고리즘을 이용하여 단자유도의 시험체에 대하여 탄성 및 비탄성 지진응답실험을 수행하였다.

2. 유사동적 실험기법

2.1 이론적인 배경

유사동적 실험기법은 동적 수치해석과 마찬가지로 구조물의 관성 및 감쇠특성뿐 아니라 지진하중을 컴퓨터내에서 고려한다. 그러나 구조물의 복원력에 대한 특성은 이론적인 모델을 사용하는 대신에 실험이 시간단계에 따라 진행되는 과정에서 변형된 시험체로부터 계측한 복원력을 수치적분과정에 직접 대입한다. 이와같이 수치적분, 변위의 제어, 복원력의 계측을 매 시간단계마다 반복적으로 수행하여 시험체의 지진응답을 얻을 수 있다. 지진하중이 시험체의 지점에서 실시간(real time)으로 직접 작용하는 진동대실험처럼, 구조물의 지진응답을 유사동적실험을 수행하여 유사하게 얻을 수 있으며, 수치적분 알고리즘에 적용되는 운동방정식내에 동적효과가 고려되었기 때문에 매시간 단계에서 계산된 변위가 준정적 실험처럼 시험체에 제어된다. 따라서 유사동적실험에서는 유압식가력기(hydraulic actuator)의 변위제어속도는 실시간으로 진행할 필요가 없으며

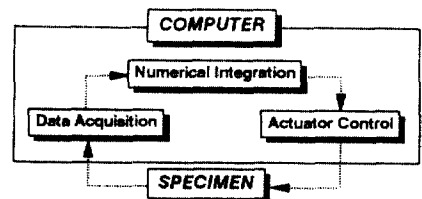


그림 2.1 유사동적 실험기법의 개괄적인 구성도

수치적분과정에서 결정된 시간간격(time interval)과는 커다란 관련이 없기 때문에 유압식가력기의 변위제어속도를 실험알고리즘내에서 실험오차가 최소로 되도록 적절히 고려할 수 있다. 유사동적 실험 기법의 개괄적인 구성도는 그림 2.1과 같다.

2.2 실험 알고리즘

2.2.1 수치적분 알고리즘

유사동적실험 알고리즘에 사용되는 수치적분방법으로는 implicit method보다 explicit method가 널리 사용되고 있다. explicit method로는 중앙차분법(central difference method) 및 explicit Newmark method 등이 있으며, 시간단계(i+1)Δt에서의 수치해는 시간단계 iΔt에서의 평형방정식으로부터 계산된다. 그러므로 explicit method에서는 시험체에 대한 강성매트릭스와 변위의 곱으로 표현되는 복원력을 실험으로부터 직접 측정하여 운동방정식에 대입할 수 있다. 특히 시험체가 비탄성범위에 있을 경우에도 explicit method를 적용하면 운동방정식의 해는 매 시간단계에 순차적으로 계산되며 단일 시간단계내에서의 반복과정을 피할 수 있다. 따라서 유사동적 실험 알고리즘에 용이하게 적용할 수 있는 커다란 장점때문에 현재까지 대부분의 유사동적실험에서는 explicit method가 사용되고 있다.⁽⁴⁾

수치적분방법을 선택함에 있어서는 안정성(stability) 및 정확성(accuracy)을 신중히 고려하여야 한다. 임의의 초기조건하에서 자유진동응답의 수치해가 발산하지 않는다면 그 수치적분방법은 안정하다고 할 수 있다. 대부분의 implicit method는 임의의 εΔt값에 대해서는 안정한 반면, explicit method는 특정한 범위내의 ωΔt값에 대해서 안정하다. 여기서 ω는 구조물의 최고차 진동수이며 단위는(rad/sec)를 사용한다. 일반적으로 ωΔt값이 작을수록 더욱 정확한 수치적분 결과를 얻을 수 있다.

구조물에 대한 운동방정식은 식 2.1과 같이 나타낼 수 있다.

$$[m]\{a_{i+1}\} + [c]\{v_{i+1}\} + \{r_{i+1}\} = \{f_{i+1}\} \quad (2.1)$$

여기서 $\{a_{i+1}\} + \{v_{i+1}\}$ 및 $\{f_{i+1}\}$ 은 각각 (i+1)Δt 시간에서의 가속도, 속도, 외력에 관한 벡터이며 $\{r_{i+1}\}$ 은 복원력벡터로서 시험체로부터 직접 얻는다.

변위벡터 $\{d_{i+1}\}$ 의 계산은 시험체의 강성 매트릭스 [k]에 관한 정보를 가지고 있어야 한다. 그러나 실제 비탄성 거동을 나타내는 시험체의 강성매트릭스 [k]를 매 시간단계마다 정확히 측정하기에는 어려움이 많기 때문에 explicit method에 의해서 변위벡터 $\{d_{i+1}\}$ 을 결정할 경우에 유사동적실험 알고리즘에서는 $[k]\{d_{i+1}\}$ 형태인 복원력 벡터 $\{r_{i+1}\}$ 을 측정한다. 복원력 벡터 $\{r_{i+1}\}$ 은 계산된 변위벡터 $\{d_{i+1}\}$ 을 유압식가력기에 의해 시험체에 직접 제어한 후 실제로 측정된 값이다. 본 실험에서 사용한 수치적분방법은 explicit Newmark method로써 중앙차분법보다 반올림오차(round-off errors)의 정도가 비교적 양호하다. Newmark 알고리즘의 외연적 적분법은 식 2.2와 식 2.3에 β=0, γ=1/2을 대입하여 얻을 수 있으며, 일반적으로 γ값이 1/2이하인 경우에 수치해가 불안정하며 γ가 1/2인 경우 가장 정확한 해를 얻는다.⁽¹⁾ 또한 식 2.3의 $\{v_{i+1}\}$ 을 식 2.1에 대입함으로써 식 2.4에서 $\{a_{i+1}\}$ 을 구한다.

$$\{d_{i+1}\} = \{d_i\} + \Delta t\{v_i\} + \Delta t^2[(1/2 - \beta)\{a_i\} + \beta\{a_{i+1}\}] \quad (2.2)$$

$$\{v_{i+1}\} = \{v_i\} + \Delta t[(1 - \gamma)\{a_i\} + \gamma\{a_{i+1}\}] \quad (2.3)$$

$$\{a_{i+1}\} = ([m] + 1/2\Delta t[c])^{-1}(\{f_{i+1}\} - \{r_{i+1}\} - [c]\{v_i\} - 1/2\Delta t[c]\{a_i\}) \quad (2.4)$$

식 2.2, 식 2.3 및 식 2.4에 의한 유사동적실험의 수치적분 알고리즘이 표 2.1에 나타나 있다. 여기서,

표 2.1. 수치적분 알고리즘(explicit Newmark방법)

1. Input Excitation : $\{f_{i+1}\}$
2. Compute Displacement Vectors:
 $\{d_{i+1}\} = \{d_i\} + \Delta t\{v_i\} + \Delta t^2\{a_i\}/2$
3. Impose $\{d_{i+1}\}$ on the Specimen
4. Measure Restoring Forces $\{r_{i+1}\}$
 from the Specimen
5. Correct Restoring Forces
6. Compute Acc. & Vel. Vectors:
 $\{a_{i+1}\} = ([m] + \Delta t[c]/2)^{-1}(\{f_{i+1}\} - \{r_{i+1}\} - [c]\{v_i\} - \Delta t[c]\{a_i\}/2)$
 $\{v_{i+1}\} = \{v_i\} + \Delta t(\{a_i\} + \{a_{i+1}\})/2$
7. Goto Step 2.

에너지 소산현상에 대한 보정을 위하여 3장에서 언급할 등가에너지 보상법에 의한 계측된 복원력의 보정이 이루어진다.

2.2.2 변위제어 및 계측 알고리즘

수치적분을 통해서 계산된 변위는 실제로 시험체에 제어되며 이때 변형된 시험체에서 계측한 복원력 값을 다음 시간단계의 변위계산에 이용하게 된다. 여기서 정확한 변위의 제어 및 복원력의 계측은 유사동적 실험기법의 가장 중요한 과정으로서 여기서 발생하는 실험오차는 실험결과에 큰 영향을 미친다.

변위제어(displacement control)는 실제 시험체에 변위를 제어하는 과정으로서 A/D 변환기(analog to digital converter)의 아날로그 출력채널(analog output channel)을 이용하여 프로그램내에서 계산된 변위값을 해당하는 아날로그 전압으로 변환한 후 유압식가력기를 제어하는 servo-valve controller내로 입력시킨다. servo-valve controller는 입력된 값과 실제 유압식가력기의 실린더내에 내장된 LVDT를 통하여 계측된 값의 차이를 영으로 수렴시키는 closed-loop제어를 수행한다. 계산된 변위를 시험체에 제어하는 과정에서는 매 시간단계에서 제어된 변위를 계측하여 계산된 변위와의 차가 허용오차이내에 있을때 까지 제어를 반복한다. 변위제어가 완료한 다음 일정 시간동안 실험 정지상태를 유지한 후에 유압식가력기의 피스톤상에 부착된 load cell로부터 복원력을 계측하며 그 값을 D/A 변환기의 디지털 입력채널(digital input channel)을 통하여 얻는다. 유압식가력기의 제어방식이 overshooting일 경우에는 제어완료 후 바로 계측함으로써 발생하는 계측오차가 실험결과를 크게 왜곡시키기 때문이다. 본 실험에서 적용한 유사동적 실험장치의 구성도는

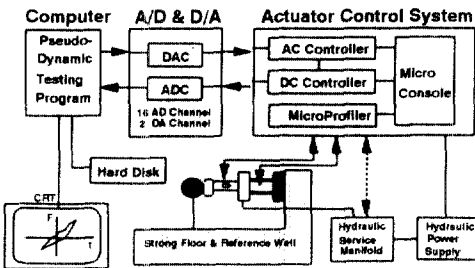


그림 2.2 유사동적 실험장치의 구성도.

그림 2.2와 같다.

3. 실험오차의 분석 및 보정

3.1 예비실험

예비실험에서는 지진응답실험에서 사용할 단자유도 시험체에 대한 유사동적 실험기법을 적용하여 자유진동실험을 수행함으로써 본 실험에서 구성한 유사동적실험 알고리즘의 성능을 평가하고자 한다. 초기조건을 가정한 예비실험 결과를 통하여 유사동적실험 알고리즘과 계측방식 및 변위제어방식의 타당성을 검토하며, 실험 수행과정에서 발생하는 실험오차를 분석하여 실험결과를 보정하였다. 예비실험에서는 단자유도 시험체에 대하여 초기변위로 인한 자유진동을 일으키도록 함으로서 시험체의 고유진동수, 감쇠, Coulomb 감쇠 및 다양한 실험오차를 지진응답 실험전에 얻을 수 있다. 수치적분 알고리즘내에서 집중질량은 $0.1592 \text{ kg} \cdot \text{sec}^2/\text{mm}$ (1.56 ton), 감쇠비는 0%로 하며 시간간격을 0.02초로 하여 자유진동실험을 수행한 결과는 그림 3.1 및 그림 3.2와

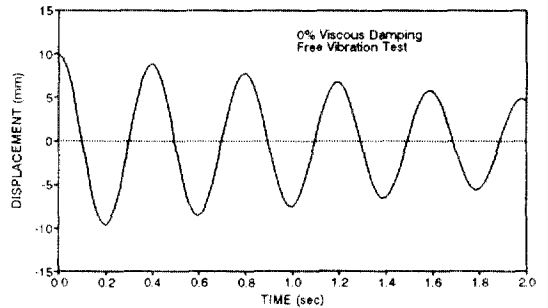


그림 3.1 예비실험 결과(변위응답).

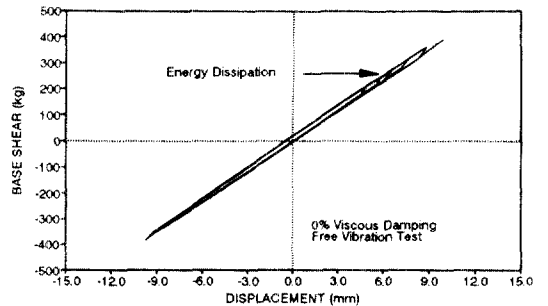


그림 3.2 예비실험 결과(힘-변위관계 곡선).

같다. 예비실험 결과에서 변위제어 및 계측과정에서 발생한 실험오차는 비록 작게 나타났지만 커다란 에너지 소산현상이 실험결과에 나타났으며, 이러한 오차의 원인을 파악하여 실험결과를 보정할 필요가 있다.

3.2 실험오차의 분석

일반적으로 유사동적실험에서는 계산된 변위를 시험체에 제어하는 과정 뿐만 아니라 시험체로부터 복원력과 변위를 계측하는 과정에서 실험오차가 발생한다. 변위제어 오차 $e^{dc}(i)$ 및 변위와 복원력에 관한 계측오차 $e^{dm}(i)$, $e^{rm}(i)$ 들을 포함한 관계식은 다음과 같다.⁽⁵⁾

$$\begin{aligned} d_m(i) &= d_c(i) + e^d(i) \\ &= d_c(i) + e^{dc}(i) + e^{dm}(i) \end{aligned} \quad (3.1)$$

$$\begin{aligned} r_m(i) &= r_c(i) + e^r(i) \\ &= r_c(i) + k \cdot e^{dc}(i) + e^{rm}(i) \end{aligned} \quad (3.2)$$

여기서 $d_c(i)$ 는 $i\Delta t$ 시간 단계에서의 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 k 는 시험체의 강성값이다. 식 3.1과 식 3.2에서 정의한 변위 제어 및 계측 과정에서 야기되는 실험오차의 누적효과를 파악하기 위하여 Shing & Mahin⁽⁵⁾이 유도한 식들을 사용하였다. 그림 3.3은 변위제어 및 계측과정에서 나타난 전체 변위오차 e^d 를 나타내며, 그림 3.4는 각각 e^d 및 e^r 에 의해서 누적된 변위오차를 보이고 있다. 본 실험 알고리즘에서는 계산된 변위값을 사용하여 다음 시간단계의 변위값을 계산하므로 e^d 에 의한 오차누적효과는 없으며 단지 e^r 에 의한 누적효과가 실험결과에 나타난다. 따라서 변위제어 및

계측과정에서 발생하는 실험오차의 누적효과는 계산된 변위를 실험알고리즘내에서 사용함으로써 크게 줄일 수 있다.⁽⁵⁾ 그림 3.4에서 얻어진 누적된 변위 오차는 변위제어 및 계측과정에서 발생한 복원력 오차에 기인한 것이며, 예비실험결과에서 나타난 에너지 소산현상에 큰 영향을 주지않는 실험오차로 판단된다.

변위제어 및 계측과정에서 비교적 작은 실험오차가 발생하였지만 예비실험에서 얻어진 변위응답에서는 커다란 에너지 소산현상이 발생하였다. 이와 같은 현상은 가력장치의 마찰력에 의한 Coulomb 감쇠로 해석되며, 그림 3.5에서 이러한 현상을 명확히 알 수 있다. 그림 3.5는 실제로 계산된 변위와 계측된 복원력사이의 관계를 보기 위하여 계측된 변위에 시험체의 강성값을 곱한 복원력에서 실제 계측한 복원력을 제외한 마찰력에 해당하는 값들을 계산된 변위응답결과와 비교하였다. 그림 3.5에서 나타난 마찰력은 속도응답과 위상이 일치하며 유압식 가력기의 피스톤 방향에 따라 마찰력의 크기가 다르게 나타나지만 각방향에 있어서는 일정한 크기의 마찰력을 유지하고 있다.

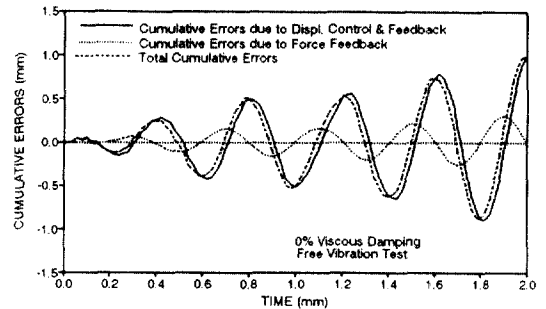


그림 3.4 누적된 변위오차.

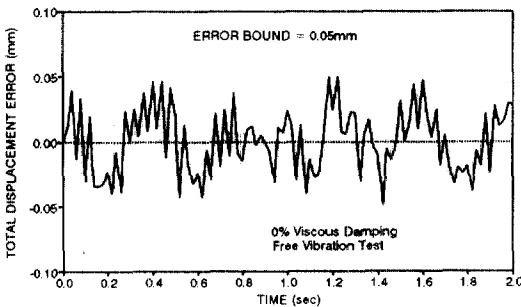


그림 3.3 전체 변위오차.

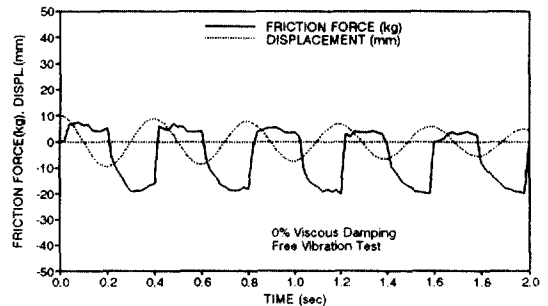


그림 3.5 변위응답과 마찰력의 관계.

3.3 실험오차의 보정

예비실험에서 얻은 변위응답결과는 가력장치의 마찰력에 의한 영향으로 명확히 밝혀졌으며, 변위 응답결과에서 나타난 에너지 소산현상을 제거하기 위한 방법으로 Shing & Mahin⁽⁶⁾이 제안한 등가에너지 보상법(equivalent energy compensation method)을 이용하여 보정할 마찰력 상수를 얻었다. 등가에너지 보상법은 운동방정식내에서 에너지가 평형을 이루도록 하여 에너지 소산 현상의 원인이 되는 마찰력을 일정한 초기의 값으로 하여 등가의 마찰력을 구하는 방법이다. 그러나 단자유도 시험체에 대한 유사동적 실험결과에 대해서는 각 자유도들사이에 복잡한 상호작용 관계가 있기 때문에 상기 방법을 적용할 경우에는 각 자유도에서의 보정할 마찰력들이 작은 값에 수렴하도록 반복해서 보정을 하여야 한다.⁽⁶⁾ 그림 3.6은 예비실험에서 얻은 단자유도 시험체에 대한 변위응답결과를 등가에너지 보상법을 이용하여 보정할 마찰력의 수렴과정을 보이고 있다. 여기서 구한 등가마찰력 8.4 kg을 유사동적실험 알고리즘상에서 계측한 복원력값에 에너지 부가현상이 나타나도록 작용시킴으로서 에

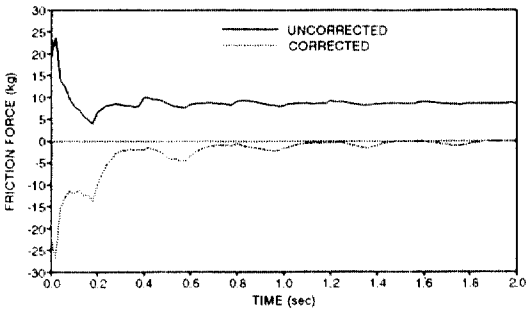


그림 3.6 등가 마찰력의 수렴과정.

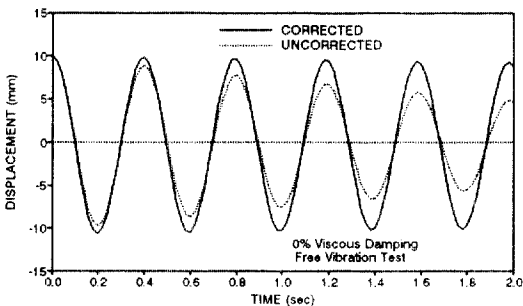


그림 3.7 예비실험 결과(보정한 변위응답과의 비교).

너지가 보정된 응답결과가 이상적인 자유진동을 보이도록 하였다. 본연구의 실험오차의 분석 및 보정 절차에 대해서는 참고문헌⁽⁷⁾에서 자세히 언급하고 있다. 그림 3.7에서 등가마찰력에 의해서 에너지가 보상된 변위응답결과와 보상되지 않은 변위응답결과를 비교하였다.

4. 단자유도 시험체에 대한 유사동적 실험

4.1 실험 개요

본 실험에서는 효율적인 유사동적실험 알고리즘의 개발에 그 목적을 두었기 때문에 단자유도의 철골 구조물을 시험체로 사용하여 지진응답실험을 수행하였다. 사용한 시험체는 H100×150×6×9 형강으로 약축에 수직으로 횡력이 작용하도록 하였다. 그림 4.1 및 그림 4.2에서의 같이 시험체의 지점에서는 두께 21 mm 철판을 용접하여 base plate에 고정력 볼트로 연결하여 고정단이 되도록 하였다. 또한 지점에서 1220 mm 상부에 유압식가력기의 swivel

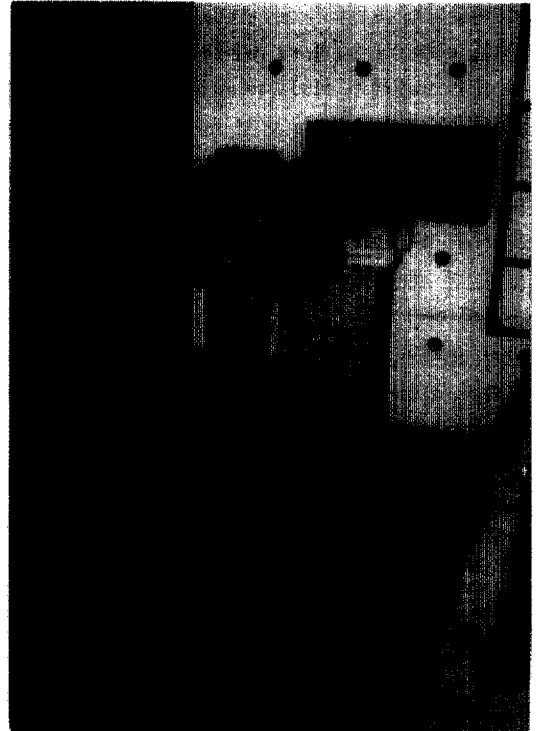


그림 4.1 유사동적실험 광경.

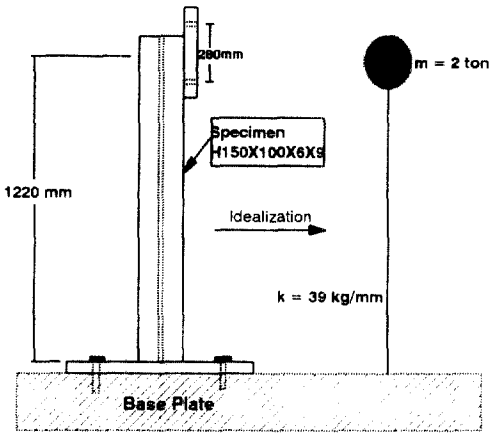


그림 4.2 시험체의 제원 및 이상화.

head와 연결하기 위하여 두께 40 mm의 철판이 사용되었다. 자유진동실험을 통하여 측정된 시험체의 강성값은 39 kg/mm로서 계산된 강성값보다 다소 작은값을 보이고 있는데 이는 지점조건이 완전하지 못한 때문으로 판단된다. 시험체에 횡력이 작용하는 위치에 $0.2041 \text{ kg} \cdot \text{sec}^2/\text{mm}$ (2.0 ton)의 집중질량이 컴퓨터 알고리즘내에서 가정되었으며, 시험체의 질량은 무시하였다. 시험체의 질량에 비하여 집중질량이 상당히 크기때문에 단자유도의 구조물로 이상화하여도 실제로 커다란 오차는 없을 것이다.

사용한 가력장치는 최대가력하중이 50ton이며 최대변위 150 mm의 MTS社 유압식가력시스템이며, 유압식가력기내에 내장되어 있는 LVDT와 load cell을 통하여 시험체에 제어된 수평변위 및 복원력을 계측하였다. 일반적으로 유압식가력기의 제어된 변위와 시험체의 변위가 일치하지 않는 경우에는 가력위치에 별도의 변위측정계를 설치하여 변위제어를 수행하지만,⁽¹⁾ 본 실험에서는 시험체의 연성(flexibility)이 상당히 크고 단자유도이기때문에 유압식가력기내에 내장된 LVDT를 통하여 변위를 제어하였다. 본 실험에서 사용한 실험시스템의 구성은 표 4.1과 같다.

앞서 수행한 예비실험에서 시험체의 강성값이 측정되었으며, 또한 변위제어 과정에서 나타난 실험오차의 분석 및 마찰력에 의한 에너지 소산현상의 제거를 통하여 개발된 유사동적실험 알고리즘의 타당성을 검증하였다. 본 실험에서는 예비실험으로부

표 4.1. 실험시스템 개요

Hydraulic Actuator	Load Cell	$\pm 50 \text{ ton}$
	LVDT	$\pm 150 \text{ mm}$
Control Type	Displacement Control (Overshooting)	
Numerical Integ. Method	Explicit Newmark Method (Time Interval=0.02 sec) (Mass=0.2041 kg·sec ² /mm)	
Program Language	QuickBasic 4.0+ Application Programs	
A/D Converter	12bit, 16ch($\pm 10 \text{ V}$), Sampling Rate : 50 Hz	
D/A Converter	12bit, 2ch($\pm 10 \text{ V}$)	
Error Bound	0.05 mm, 0.05% of Full Range	

터 타당성이 입증된 유사동적실험 알고리즘을 사용하여 지진응답실험을 수행하였다. 입력지진파는 Taft (1952) N21E 성분으로서 최대지반가속도를 0.06 g 및 0.40 g를 적용하였으며, 수치적분 알고리즘내에 입력된 시험체의 점성감쇠비는 0%, 1% 및 2%를 사용하여 지진응답결과를 비교하였다

4.2 탄성 지진응답실험

그림 4.3은 최대 지반가속도 0.06 g의 Taft N21E 지진하중에 대한 탄성 지진응답실험 결과이다. 앞서 수행한 예비실험 결과로부터 에너지소산현상을 야기시키는 마찰력의 크기를 등가에너지 보상법을 통하여 구한 후 매 시간단계마다 계측된 복원력을 마찰력의 크기에 의해서 보정하였다. 그림 4.3은 점성감쇠비를 1%로 가정하여 유사동적실험을 수행한 결과 얻어진 변위응답인데, 계측한 시험체의 강성값을 사용하여 수치해석한 변위응답과 비교적 잘 일치함을 알 수 있다. 그림 4.4는 시험체의 점성감쇠비를 각각 0%와 1%로 가정하여 얻어진 변위응답이다. 결과에서 보듯이 탄성범위내에서는 주로 점성감쇠에 의해서 에너지 소산현상이 나타나기 때문에 감쇠계수의 변화에 따라 최대응답변위의 크기를 좌우한다.

4.3 비탄성 지진응답실험

그림 4.5는 시험체의 점성감쇠비를 1% 및 2%로 가정하여 최대지반가속도 0.4 g에 대한 지진응답실험결과로서 시험체의 지점부근에서 소성힌지가 발생하여 변위응답에 drift가 발생하였다. 시험체가 비탄성거동을 하는 경우에 점성계수의 영향을 검증하기 위하여 실험을 수행한 결과, 그림 4.5에서 보듯이 비탄성범위에서는 점성계수가 변위응답결과에 거의 영향을 주지않았다. 비탄성범위에서 구조물의 에너지소산현상은 부재에서 발생하는 소성힌지에

의해 지배되기때문에 점성감쇠의 영향은 상대적으로 줄어든다. 따라서 유사동적실험에서는 구조물의 비탄성거동을 파악하는데 목적을 두고 있기때문에 불확실한 점성계수의 가정에 큰 의미를 부여하지 않는다. 그림 4.6은 시험체의 비탄성거동을 나타내는 힘-변위관계 곡선으로서 커다란 에너지 소산이 발생하였음을 알 수 있다. 그림 4.7은 비탄성거동에 의한 시험체의 손상정도를 파악하기 위하여 변위응답에 대한 Fourier spectrum을 구하였다. 탄성거동에서 얻어진 시험체의 고유진동수는 2.2 Hz인데 비

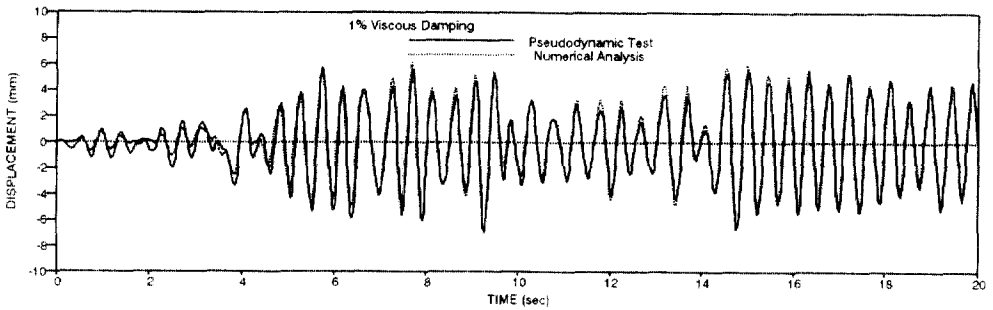


그림 4.3 Taft 0.06 g에 대한 변위응답(감쇠비 1%).

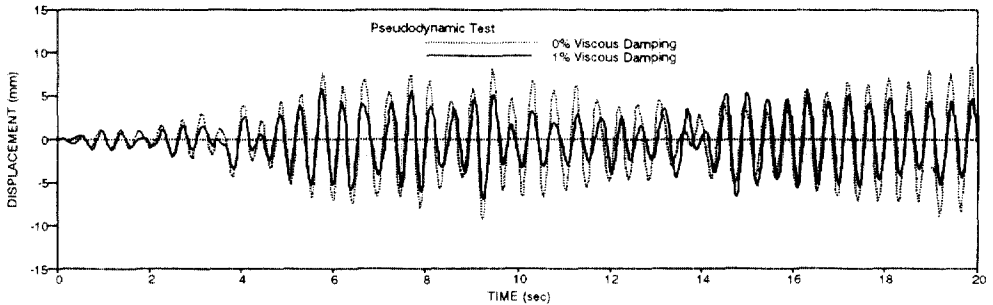


그림 4.4 Taft 0.06 g에 대한 변위응답(감쇠비 0% 및 1%)

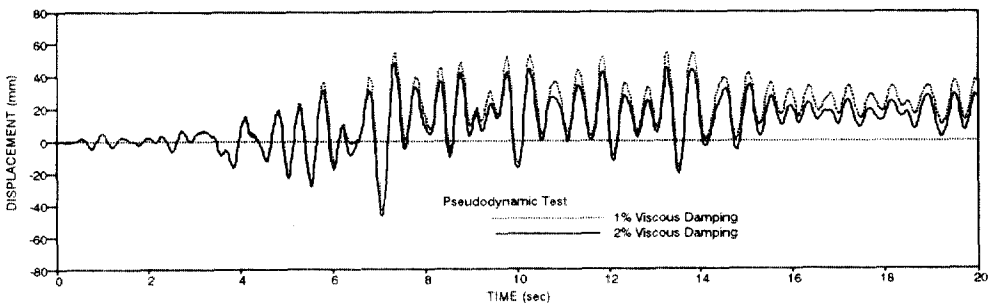


그림 4.5 Taft 0.4 g에 대한 변위응답(감쇠비 1% 및 2%)

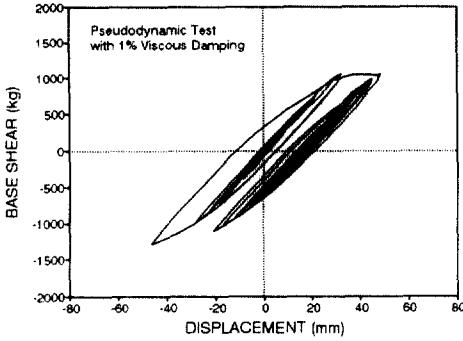


그림 4.6 Taft 0.4 g에 대한 힘-변위관계 곡선(감쇠비 1%)

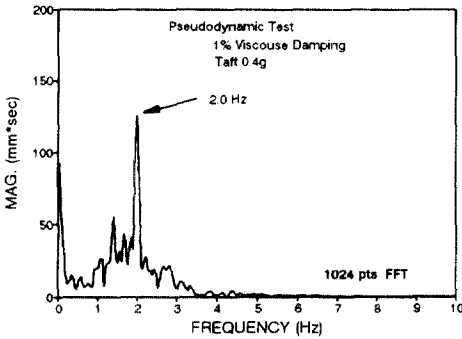


그림 4.7 Taft 0.4 g에 대한 변위응답의 Fourier Spectrum.

탄성거동에서는 약 2.0 Hz로 작아졌으며, 시험체의 강성값도 약 32 kg/mm로 줄어들었다.

5. 결 론

본 연구에서 수행한 실험결과를 바탕으로 다음과 같은 결론을 얻었다.

- 1) 마찰력에 의한 커다란 실험오차는 에너지소산 현상으로 나타나며 등가에너지 보상 법에 의해서 효율적으로 제거할 수 있다.
- 2) 대상시험체에 대한 감쇠계수의 가정은 비탄성 범위에서는 커다란 영향을 미치지 못하므로 수치적 분 알고리즘상에서 점성감쇠계수를 무시할 수 있다.
- 3) 본 연구에서 수행한 단자유도 시험체에 관한

유사동적실험은 실제 구조물의 동적거동을 파악하기 보다는 유사동적실험 알고리즘 자체의 개발에 역점을 두었다. 따라서 단순화된 단자유도 시험체를 대상으로 유사동적 실험기법의 타당성을 충분히 검토하고 알고리즘의 성능을 평가함으로써, 실제 내진 성능 평가를 위한 실험기법으로서 적용할 수 있다.

감사의 글

이 연구는 1991년도 한국과학재단 특정기초연구, 과제번호 91-07-00-15의 1차년도 연구비 지원에 의한 결과로서 이에 관계기관에 감사드린다.

참 고 문 헌

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", *Earthquake Engineering Research Center*, 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.
7. 김남식, 이상순, 정우정, 이동근, "類似動的實驗 誤差의 分析 및 補正", *한국전산구조공학회 학술발표회 논문집*, 제5권 제1집, 1992, pp.95-101.

(接受 : 1992. 8. 10)