

## 類似動的 實驗技法

### Pseudodynamic Testing Method

李 東 根\* 金 南 植\*\*

#### 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 있다. 지금까지 수많은 연구에 진동대가 활용되었으나 진동대의 크기 및 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 구조물에서는 응력-변형도관계(stress-strain relationship)에 대한 상사성을 기초로하여 재료거동 특성을 비교적 정확히 가정하여도 전체구조물의 비탄성거동이 국부적인 재료 비선형에 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 類似動的 實驗(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.

유사동적 실험기법은 대규모 시험체에 대한 동적실험이 가능하며 또한 전체 구조물에서 비선형 거동을 지배하는 부분구조물(substructure)을 시험체로 하여 동적실험을 수행함으로써 경제적이며 타당성있는 실험결과를 얻을 수 있다.

#### 2. 實驗方法

유사동적실험은 기존의 동적수치해석과 동일한 방법으로 구조물의 관성 및 감쇠특성뿐 아니라 외부작용하중(external load)을 컴퓨터내에서 수치적으로 고려한다. 그러나 구조물의 復元力(restoring force)에 대한 특성은 특히 시험체가 비탄성 범위에 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 시간 단계마다 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 고려

\* 正會員, 韓國科學技術院 土木工學科 副教授

\*\* 正會員, 韓國科學技術院 土木工學科 博士課程

되었기 때문에 매 시간단계에서 계산된 변위가 정적으로 시험체에 제어된다. 유사동적 실험기법은 수치적분 알고리즘, 변위제어 알고리즘 및 계측 알고리즘으로 크게 나눌 수 있으며 개략적인 실험방법은 그림 2.1과 같다. 또한 그림 2.2에서는 유사동적 실험장치의 구성도를 나타내고 있다.

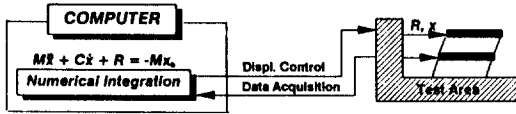


그림 2.1 개략적인 유사동적 실험방법

유사동적실험기법은 컴퓨터내에서 시험체를 단순하게 모델링하여 동적응답을 얻는다. 이때 비선형 특성을 갖는 복원력은 시험체로부터 직접 계측하여 운동방정식에 포함된다. 따라서 유사동적 실험기법을 일명 “Hybrid Experiment” 또는 “On-Line Computer Controlled Test”라고 한다. 유사동적실험에서 얻어진 동적응답은 근사적인 값으로서 기본적인 가정은 다음과 같다.

- i) 모든 시험체의 동적특성은 운동방정식에 의해 표현된다.
- ii) 구성된 운동방정식의 해는 정확성을 신뢰할 만한 수준에서 얻어진다.
- iii) 운동방정식에서 얻어진 변위는 작은 오차범위(error bound)내에서 제어된다.
- iv) 상기의 과정들은 적절한 기능과 신뢰성을 갖는 실험장치에 의해 수행된다.

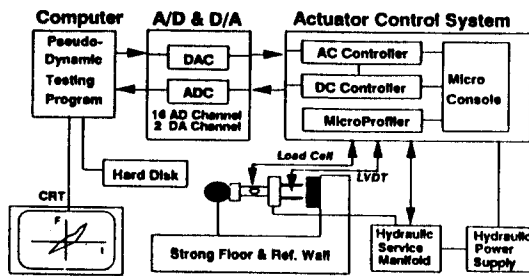


그림 2.2 유사동적 실험장치의 구성도

### 3. 數値積分 알고리즘

유사동적 실험기법에 사용되는 수치적분 알고리

즘은 크게 explicit method와 implicit method로 구분되며, 부분구조물에 대한 실험에 적용하기 위하여 두가지 적분방법을 병행하는 mixed integration method가 있다.

#### 3.1 Explicit Method

Explicit method로는 중앙차분법(central difference method) 및 explicit Newmark method 등이 있으며, 시간단계  $(i + 1)\Delta t$ 에서의 수치적분해는 시간단계  $i\Delta t$ 에서의 평형방정식으로 부터 계산된다. 그러므로 explicit method에서는 시험체에 대한 강성매트릭스보다는 강성매트릭스와 변위의 곱으로 표현되는 복원력을 실험으로부터 계측하여 운동방정식에 대입할 수 있다. 특히 시험체가 비탄성범위에 있을 경우에도 explicit method를 사용하면 운동방정식의 해는 매 시간단계에 순차적으로 계산되며 단일 시간단계내에서의 반복과정을 피할 수 있다. 따라서 유사동적실험 알고리즘에 용이하게 적용할 수 있는 커다란 장점 때문에 현재까지 대부분의 유사동적실험에서는 explicit method가 사용되고 있다[4]. 그러나 explicit method는 수치적 안정조건(stability criterion)에 제약을 받기 때문에 시간간격  $\Delta t$ 가 구조물의 최고차 진동수에 의존하여 결정된다. 따라서 다자유도 시험체에 대해서 explicit method를 적용할 경우에는 시간간격  $\Delta t$ 가 상당히 작아지며, 결과적으로 시간단계가 증가함으로서 커다란 오차누적효과(error propagation effects)가 실험결과에 나타난다.

#### 3.2 Implicit Method

Implicit method는 앞절에서 언급한 수치적 안정조건에 제약을 받지 않기 때문에 다자유도 시험체에 대한 적용이 비교적 용이하다. 그러나 적분방법의 특성상 각 시간단계에서의 강성매트릭스를 운동방정식내에 대입해야 한다. 시험체가 탄성범위에 있을 경우에는 초기강성(initial stiffness)을 계측하여 일정하게 적용할 수 있지만, 비탄성범위에서는 시간단계에 따라 변화하는 강성값을 정확히 계측하기에는 어려움이 있다. Thewalt & Mahin[4]은 implicit method로서

Hilber, Hughes & Taylor[7]가 개발한  $\alpha$ -dissipated method를 사용함으로써 발생하는 실험상의 문제점을 극복하기 위하여 아날로그 회로(analog circuit)를 고안하였다. 여기서 사용된 아날로그 회로는 implicit method에서 접선강성(tangent stiffness)에 대한 수렴과정을 회로상에서 수행한다.

특히, 시험체에 회전관성력(rotational inertia)을 고려할 경우에는 implicit method를 사용함으로써 신뢰할만한 실험결과를 얻을 수 있다. 그러나 현재까지의 유사동적실험에서는 implicit method를 실험에 적용하기에 다소 어려움이 있기 때문에 널리 사용되지 않고 있다.

### 3.3 Mixed Integration Method

부분구조물에 대한 유사동적실험을 수행할 경우에는 실험영역(tested part)과 수치해석영역(computed part)로 나누어 실험을 수행하게 되는데, 여기서 비탄성거동을 보이는 부분구조물을 실험영역으로 적용하며, 그외의 수치해석영역은 탄성거동으로 가정한다. 앞서 언급한 두가지 수치해석방법을 혼합한 mixed integration method를 유사동적실험에 적용할 경우에는 부분구조물에 대한 실험이 가능하며, 또한 다자유도 구조물에 대한 정확한 실험결과를 얻을 수 있다. 그림 3.1은 다자유도 구조물에서 부분구조물이 비선형 거동을 지배한다는 가정하에 유사동적 실험기법을 적용한 예이다. 그림에서 알 수 있듯이 부분구조물만을 시험체로 하여 대형구조물의 비탄성동적거동을 효율적으로 얻을 수 있다.

유사동적실험에 사용된 mixed integration method는 다음과 같다.

- i) Central Difference Method-Newmark Method[8]
- ii) Predictor Corrector Method-Newmark Method[9]
- iii) Operator-Splitting Method[10]

여기서 operator-splitting method는 특히 시험체의 재료적 특성이 softening 형태일 경우에 수치적 안정조건에 제약을 받지 않는 것으로 증명되었으며[10], Nakashima [11]는 operator-splitting

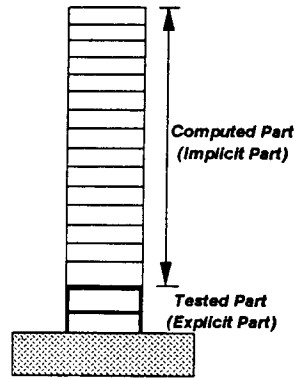


그림 3.1 Mixed Integration Method의 적용예

method를 이용하여 부분구조물에 대한 유사동적 실험을 수행하였다.

## 4. 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 규칙적인 오차(systematic errors)로 나눌 수 있다.

### 4.1 랜덤 오차(Random Errors)

랜덤오차는 A/D변환기(analog to digital converter)의 제한된 분해능력(resolution)에 의해 주로 아날로그 신호가 디지털 신호로 변환하면서 발생하는 반올림오차(round-off errors)로 나타난다. 즉, A/D변환기의 비트수에 직접적으로 의존하기 때문에 아날로그신호의 분해능력에 따라 랜덤오차의 크기가 좌우된다. 랜덤오차를 제거하기는 어렵지만 오차의 크기는 일반적으로 작으며, 규칙적인 오차보다 실험결과에 적은 영향을 미치고 있다 [5].

### 4.2 규칙적인 오차(Systematic Errors)

실험결과를 크게 왜곡시키는 주된 실험오차는 규칙적인 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.

#### 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 결정하는 것이 실험오차를 최소화 할 수 있는 방법이다. 그러나, 계측장비의 비선형성 및 부정확한 변환계수에 의해 시험체의 특성에 오차가 포함됨으로서 결과적으로 실험결과를 왜곡시킬 수 있다.

#### 나) 절단오차(Truncation Errors)

D/A변환기(digital to analog converter)를 통하여 디지털 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 디지털 컴퓨터상에서 명령한 값보다 작은 값이 출력된다. 따라서 절단오차는 실험결과에 에너지부가현상(energy addition effect)으로 나타난다.

#### 다) 마찰오차(Friction Errors)

실험에 앞서 유압식가력기의 용량 및 지지조건에 대한 세밀한 설계가 이루어진다면 지지장치의 변형은 방지할 수 있지만, 유압식가력기가 양단힌지의 구조로 되어 있기 때문에 완벽한 힌지역할을 못할 경우 마찰력을 발생시키며 힌지에서 발생하는 유격(backlash) 또한 실험결과에 큰 영향을 준다. 여기서 마찰력에 의한 에너지소산현상(energy dissipation effect)은 실험결과에 마찰감쇠(Coulomb damping)로 나타나며, 대체로 이러한 감쇠는 변위의 크기에 비례하는 감쇠현상을 보이

기 때문에 일반적으로 구조물에 적용되는 점성감쇠(viscous damping)와는 구별된다. 마찰감쇠에 의한 에너지소산현상은 실험결과에 커다란 실험오차를 야기한다.

#### 라) 변위제어 오차(Displacement Control Errors)

변위제어 오차는 부정확한 gain의 조절 또는 servovalve용량에 의해 주로 발생되며, 시험체의 응답주기(변위 또는 속도)와  $90^\circ$  또는  $-90^\circ$ 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 조절하는 것이 유리하다[1].

## 5. 應用分野

유사동적 실험기법은 컴퓨터내에서 대상시험체를 수치적으로 모델링하기 때문에 상당히 광범위한 분야에 걸쳐서 응용이 가능하며 다음과 같은 실험들이 현재까지 수행되었다.

- i) 建物の 동적거동실험[12]—[14]
- ii) 橋梁의 동적거동실험[15], [16]
- iii) 地盤—構造物 상호작용실험[17]—[21]
- iv) 副構造物의 동적거동실험[4], [22]
- v) Base Isolator의 동적특성실험[11], [23]

## 6. 追後の 研究課題

지진하중에 대한 내진성능을 평가하기 위하여 유사동적 실험기법은 다양한 시험체를 대상으로 응용되어 왔다. 특히 실물크기의 시험체에 대한

실험이 가능하다는 특징때문에 substructuring 기법을 도입하여 부분구조물에 대한 유사동적실험이 활발히 진행되고 있으며[11], substructuring 기법에 사용되는 수치적분 알고리즘의 효율성 및 새로운 보완이 필요한 것으로 판단된다.

근래에 구조물의 진동제어(vibration control)를 목적으로 개발된 rubber bearing, viscous damper 등은 두드러진 감쇠특성을 갖고 있는 장치로서 strain-rate 효과에 비교적 민감하다. 지금까지의 유사동적실험은 준정적으로 실험이 수행되었으나, 이러한 장치가 설치된 구조물의 진동제어 성능실험을 위해서는 가능한 실시간(real time)에 가까운 실험 진행속도를 갖는 것이 유리하다. 최근에 Nakashima[24]는 digital servo mechanism을 이용하여 실시간에 가까운 실험속도의 유사동적실험을 수행하였으며, 이에 대한 지속적인 연구를 진행하고 있다.

#### 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, 四俵正俊, 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. H.M.Hilber, T.J.R.Hughes, and R.L.Taylor, "Improved Numerical Dissipation for Time Integration Algorithms in Structural Dynamics", Earthquake Engineering and Structural Dynamics, Vol.5, 1977, pp.283-292.
8. T.Belytschko and R.Mullen, "Stability of Explicit-Implicit Mesh Partitions in Time Integration", Int. J. of Numerical Methods in Engrg., Vol.12, 1978, pp.1575-1586.
9. T.J.R.Hughes and W.K.Liu, "Implicit-Explicit Finite Elements in Transient Analysis : Stability Theory", J. of Applied Mech., ASME, 45(6), 1978, pp.371-374.
10. M.E.Plesha and T.Belytschko, "A Constitutive Operator Splitting Method for Nonlinear Transient Analysis", Computers & Structures, 20(4), 1985, pp.767-777.
11. M.Nakashima, T.Kaminosono, M.Ishida and K.Ando, "Integration Techniques for Substructure Pseudo Dynamic Test", Proceedings of Fourth U.S. National Conference on Earthquake Engineering, 1990, Palm Springs, California, Volume 2.
12. T.Kaminosono, S.Okamoto, Y.Kitagawa and M.Yoshimura, "Testing Procedure and Preliminary Test Results of a Full Scale Seven Story Reinforced Concrete Building", ACI, sp-84, 1985, pp.105-132.
13. D.A.Foutch, S.C.Goel and C.W.Roeder, "Seismic Testing of Full-Scale Steel Building-Part I", J. of Structural Engrg., ASCE, 113(11), 1987, pp.2111-2129.
14. C.W.Roeder, D.A.Foutch, S.C.Goel, "Seismic Testing of Full-Scale Steel Building-Part II", J. of Structural Engrg., ASCE, 113(11), 1987, pp.2130-2145.
15. H.Shimizu, "Hybrid Experiments of Steel Box-type Bridge Piers", M.S. Thesis, Kyoto University, 1989.
16. Y.Yamada, H.Iemura, W.Tanzo, M.Yasuda and S.Oka, "Substructured Hybrid Earthquake Loading Test of Steel Box Pier Models", U. S.-Japan Seminar on Cyclic Buckling of Steel

- Structures and Structural Elements under Dynamic Loading Conditions, July, 1991.
17. T.Katada and M.Hakuno, "On-Line Experimental Analysis of Surface Ground in Liquefaction Process", Third Int. Earthquake Microzonation Conference, June, 1982, Seattle.
  18. T.Katada and M.Hakuno, "Nonlinear Analysis of Surface Ground Motions by Digital Control On-Line Experimental Method". Pro., 8th WCEE, San Francisco, Calif., Vol.3, 1984, pp. 1033 – 1040.
  19. K.Toki, T.Sato, J.Kiyono, N.K.Garmroudi and M.Yoshikawa, "Hybrid Experiment on Nonlinear Restoring Force of Pile Foundations", The Annals of the Disaster Prevention Research Institute, Kyoto University, No.32, B-2, April, 1989.
  20. K.Toki, T.Sato, J.Kiyono, N.K.Garmroudi and M.Yoshikawa, "Hybrid Experiments on Nonlinear Soil-Structure Interaction of Soil-Pile Systems", The Annals of the Disaster Prevention Research Institute, Kyoto University, No.33, B-2, April, 1990.
  21. K.Toki, T.Sato, J.Kiyono, N.K.Garmroudi, S. Emil and M.Yoshikawa, "Seismic Behaviour of Pile Engineering and Structural Dynamics, Vol.20, 1991, pp.895 – 909.
  22. K.Sato, A.Higashiura and T.Yanase, "Experimental Study on Seismic Behavior of Two-Storeyed Sophisticated Model for Nuclear Reactor Building using Pseudo Dynamic Testing Method" Pro., 9th WCEE, Tokyo-Kyoto, Japan, Vol.4, 1988, pp.95 – 100.
  23. H.Iemura, Y.Yamada, W.Tanzo, Y.Uno and S.Nakamura, "On-Line Earthquake Response Tests of High-Damping Rubber Bearings for Seismic Isolation", 1th U.S.-Japan Workshop on Earthquake Protective Systems for Bridges, Sept. 1991, New York.
  24. M.Nakashima, H.Kato, and E.Takaoka, "Development of Real-Time Pseudo Dynamic Testing", Earthquake Engineering and Structural Dynamics, Vol.21, 1992, pp.79 – 92.